

Н. Ф. КРОТЕВИЧ

МАГНИТНЫЕ
МИКРОВАРИАЦИОННЫЕ
ИЗМЕРЕНИЯ
И АППАРАТУРА
ДЛЯ МАГНИТО-
ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

Н. Ф. КРОТЕВИЧ

МАГНИТНЫЕ
МИКРОВАРИАЦИОННЫЕ
ИЗМЕРЕНИЯ И АППАРАТУРА
ДЛЯ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Ответственный редактор
доктор технических наук Г. А. Штамбергер

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» · СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
НОВОСИБИРСК · 1972

В книге освещен круг вопросов, связанных с измерениями вариаций магнитного поля Земли, которые находят применение в различных геофизических исследованиях и, в частности, в магнитотеллурических методах. Приведен достаточно полный анализ магнитостатических измерительных систем с фотоэлектрическим преобразованием и определены пределы амплитудно-частотного диапазона, в котором применение этих систем дает наибольший эффект.

Дано техническое описание микровариационной аппаратуры, разработанной автором; даны рекомендации по расчету, настройке и эксплуатации этой аппаратуры.

Книга может служить руководством для работников научных и производственных организаций, занимающихся вопросами измерения вариаций геомагнитного поля. Она может быть полезной также для конструкторов, занимающихся разработкой приборов подобного типа.

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные возмущения низких и инфранизких частот по ряду признаков четко разделяются на два типа: микро- и макрвариации. К первому типу относятся слабые колебания магнитного поля Земли интенсивностью от нескольких сотых долей гаммы* до единиц гамм в диапазоне частот от тысячных долей до одного герца (вариации типа Pc(9, 67, 68)), ко второму типу — все вариации в диапазоне ниже 0,005—0,001 *гц*, отличающиеся от первых также морфологией и значительно большей интенсивностью более 5 гамм [79].

Регулярные измерения макрвариаций проводятся с конца прошлого столетия в специальных геомагнитных обсерваториях. Микровариационные измерения стали впервые осуществляться в период Международного Геофизического Года (1957—1958 г.) благодаря усовершенствованию магнитостатического метода и созданию новых: флюксметрического [33] и несколько позже — квантово-оптического [81, 82, 83].

Интерес к микровариациям магнитного поля Земли обусловлен возможностью использования их в целях изучения свойств ионосферы и магнитосферы. Роль микровариационных измерений еще более возросла в связи с разработкой в пятидесятые годы комплекса магнитотеллурических методов исследований глубинного строения Земли [7, 9]. Глубинность исследования земной коры с помощью вариаций естественного электромагнитного поля растет с увеличением периодов вариаций, поэтому спектр колебаний, используемых в магнитотеллурических методах, охватывает в основном низкие и инфранизкие частоты: 10^{-5} —10 *гц*.

В указанном диапазоне частот заметными преимуществами среди возможных средств измерения выделяются микровариометры с магнитостатическими датчиками. В Ленинградском университете в 1957—1958 г. под руководством Б. Е. Брюнелли на основе кварцевого магнитостатического датчика [74] был разработан высокочувствительный магнитометр [4, 18], который по своим метрологическим и эксплуатационным характеристикам в то время наиболее полно отвечал требованиям магнитотеллурических исследований. Это весьма ощутимый скачок в магнитостатическом методе измерений. Принципиальными новшествами разработанного магнитометра были, во-первых, способ введения обработанной отрицательной связи и, во-вторых, способ магнитного демпфирования, которые в сочетании с фотоэлектрическим преобразованием магнитного поля позволили на два-три порядка презойти чувствительность нормальных магнитографов**. Основные принципы магнитометра, разработанного в ЛГУ, использованы во многих, созданных позже, установках магнитостатического типа [22, 24, 31, 41, 60].

Большим прогрессом в развитии магнитометрической аппаратуры за период с 1955 г. следует считать создание в Институте Земного магнетизма АН СССР В. Ф. Шельтингом и В. Н. Бобровым универсальных магнитостатических систем [10, 74]. Эти системы кроме своего прямого использования в качестве нормальных магнитометров нашли широкое

* 1 гамма = 10^{-5} эрстеда.

** Магнитографы нормальной серии используются для непрерывной регистрации магнитных солнечно-суточных вариаций.

применение в микровариационных установках в качестве датчиков магнитного поля.

Разработка и успешное внедрение промышленной серии полевых высокочувствительных магнитометров были осуществлены во ВНИИ Геофизике М. Н. Бердичевским, А. М. Алексеевым и А. Е. Ланцовым [1, 9], чему в значительной мере способствовало создание в этом институте портативной экспедиционной аппаратуры для осциллографической регистрации естественных электромагнитных полей [2].

Несколько вариантов магнитовариационных установок было предложено сотрудникам Института Земного магнетизма АН СССР и Института Физики Земли АН СССР В. Ф. Шельтингом, Н. В. Липской, Н. А. Денискиным, Ю. М. Егоровым [28, 29, 48].

Некоторые работы посвящены уменьшению инерционности микровариометров [22, 30] и поискам новых систем фотоэлектрического преобразования магнитных полей [3, 24, 60].

При выполнении автором магнитотеллурических исследований в 1960—1966 г. в Институте геологии и геофизики СО АН СССР осуществлялось дальнейшее усовершенствование магнитометрической аппаратуры [44, 45] в соответствии с задачами глубинных магнитотеллурических зондирований [9] и теми условиями, в которых проводились эти исследования.

Результаты аппаратурных разработок были положены в основу данной работы, важнейшими из которых являются анализ возможностей магнитостатического метода измерений, улучшение ряда параметров магнитного микровариометра и, главным образом, расширение его частотного диапазона за счет уменьшения дрейфа «нуля» и оптимизации магниточувствительных датчиков, разработка конструкции микровариационной станции типа ГГ42 в ламповом варианте, достаточно полно отвечающей требованиям полевых магнитотеллурических исследований.

Резервом дальнейшего улучшения эксплуатационных характеристик магнитовариационной аппаратуры является построение электронных преобразователей на транзисторах. Особенно перспективно применение полевых транзисторов в тех целях, где электронные лампы являются пока незаменимыми.

Производство микровариационных станций типа ГГ42 было налажено на Опытном заводе СО АН СССР.

В первой части работы рассмотрены принципы построения магнитовариационных приборов с фотоэлектрическим преобразованием, проведен анализ характеристик измерительного канала (чувствительности, шумовых, частотных и переходных характеристик) и даны принципы расчета конструктивных элементов.

Во второй части изложены технические вопросы: устройство аппаратуры, технические данные, вопросы эксплуатации и применения в геофизических исследованиях, способы экспериментального определения параметров. Приведен обширный табличный материал, необходимый для практического использования в процессе эксплуатации аппаратуры и расчета ее частотных и переходных характеристик.

В заключение автор выражает глубокую признательность доктору физико-математических наук Б. Е. Брюнелли, под руководством которого выполнялись исследования на первом этапе, а также докторам технических наук Л. Л. Ваньяну, М. Н. Бердичевскому, А. А. Кауфману и Г. А. Штамбергера за помощь в работе.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ СЛАБЫХ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

ОСНОВЫ
МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО
МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ
СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Принцип работы магнитометра
с фотоэлектрическим преобразованием

Высококчувствительные магнитометры с фотоэлектрическим преобразованием (рис. 1) строятся по принципу фотогальванометрических усилителей [47, 56, 61]. Различие состоит в том, что в первом случае датчиком является магнитоэлектрическая система (магнитный вариометр), во втором — зеркальный гальванометр.

Конструкция датчика с магнитоэлектрической системой довольно проста. Магнит подвешивается на упругом подвесе или на растяжках, которые служат осью вращения магнита. С магнитом жестко связано зеркало, позволяющее с помощью светового луча делать либо непосредственный отсчет отклонений магнита, либо преобразовывать отклонения магнита в электрические сигналы в схемах с фотоэлектрическим преобразованием, как показано на рис. 1.

Известное условие равновесия магнита с моментом M , подвешенного на упругой нити, как на оси, которая закручена на угол Θ , имеет вид:

$$[\vec{MH}] = G\Theta, \quad (1)$$

\vec{H} — вектор напряженности магнитного поля в плоскости вращения магнита; G — удельный противодействующий момент нити (или коэффициент кручения).

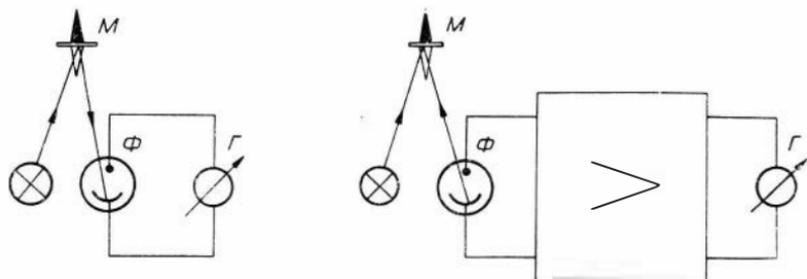


Рис. 1. Простейшие схемы магнитометров с фотоэлектрическим преобразованием.

Если ось вращения магнита направить по оси Z прямоугольных координат, то вращение магнита будет происходить в плоскости XY .

Условие равновесия магнита в этом случае запишется так:

$$M_y H_x - M_x H_y = G\Theta. \quad (2)$$

Придавая малое приращение вектору \vec{H} , получим новое условие равновесия магнита:

$$[(\vec{M} + \delta\vec{M}), (\vec{H} + \delta\vec{H})] = G(\Theta + \delta\Theta). \quad (3)$$

Учитывая (1) и (2), получаем из (3) следующее уравнение:

$$\delta M_y H_x + \delta H_x M_y - \delta M_x H_y - \delta H_y M_x = G\delta\Theta. \quad (4)$$

Рассмотрим частные случаи этого выражения:

1. Ось Y совместим с направлением \vec{H} ; ось магнита совместим с осью Y , т. е. с направлением вектора \vec{H} . Так ориентируется датчик при измерении вариаций δH_x , которые называют также вариациями склонения — δD . Тогда будем иметь:

$$H_x = 0, H_y = H, M_x = 0, M_y = M. \quad (\text{рис. 2, a}).$$

Уравнение (4) будет иметь вид:

$$M\delta H_x - H\delta M = G\delta\Theta. \quad (5)$$

Замечая, что угол отклонения магнита от положения равновесия и есть $\delta\Theta$ (так как концы оси вращения магнита закреплены неподвижно), получим $\delta M = M\delta\Theta$ и

$$\delta H_x = \left(\frac{G}{M} + H \right) \delta\Theta. \quad (6)$$

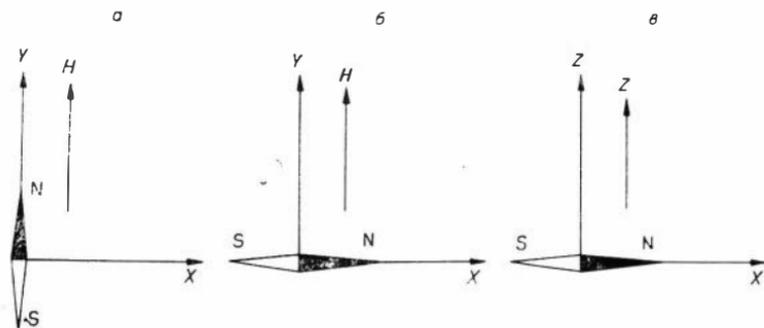


Рис. 2. Главные положения магнитостатических систем датчиков при измерении вариаций геомагнитного поля:
 а — при измерении D-вариаций, б — при измерении H-вариаций,
 в — при изменении Z-вариаций.

Постоянная $\frac{G}{M} + H$ определяет цену деления датчика:

$$\epsilon_x = \frac{G}{M} = H.$$

2. Ось Y совмещена с направлением \vec{H} .

Ось магнита совмещена с осью X, т.е. перпендикулярна \vec{H} . Это соответствует установке датчика для измерения вариаций горизонтальной составляющей геомагнитного поля δH_y . В этом случае $H_x = 0$; $H_y = H$; $M_x = M$; $M_y = 0$ (рис. 2, б) и из уравнения (4) получим:

$$-H\delta M_x - M\delta H_y = G\delta\Theta. \quad (7)$$

Заметим, что $\delta M_x = M(1 - \cos\delta\Theta) = M\frac{\delta\Theta^2}{2}$ вследствие малости угла $\delta\Theta$, и поэтому слагаемым $H\delta M_x$ можно пренебречь. Следовательно,

$$\delta H_y = -\frac{G}{M} \delta\Theta, \quad (8)$$

где $\epsilon_y = \frac{G}{M}$ — цена деления датчика.

3. При измерении вертикальной составляющей геомагнитного поля δH_z ось вращения магнита совмещается с осью Y, т.е. с направлением \vec{H} ; магнит совмещается с осью X (рис. 2, в) и в этом случае будем иметь равенство, аналогичное (8):

$$\delta H_z = -\frac{G}{M} \delta\Theta, \quad (9)$$

где $\epsilon_z = \frac{G}{M}$ — цена деления датчика.

Во всех рассмотренных случаях мерой величины магнитных вариаций служит угол отклонения магнита: $dH = \varepsilon \delta \Theta$.

На практике, однако, измеряют не угол, а линейное перемещение светового индекса датчика dn , которое отсчитывается по шкале, находящейся на расстоянии l от датчика. Под шкалой подразумевается любое отсчетное устройство.

$$\text{Тогда} \quad dH = \varepsilon' dn, \quad (10)$$

$$\text{где} \quad \varepsilon' = \frac{\varepsilon}{l}.$$

Основное назначение фотоэлектрических устройств — преобразовывать ничтожные отклонения магниточувствительных систем в ток, которые могут создать больше отклонения вторичных индикаторов (гальванометров), т. е. в конечном счете увеличивать чувствительность магнитометров.

Ток на выходе фотоэлектрического преобразователя пропорционален смещению светового индекса датчика $di = \Phi dn$, поэтому мерой величины вариаций магнитного поля является ток, регистрируемый на выходе фотоэлектрического устройства:

$$dH = \frac{\varepsilon'}{\Phi} di, \quad (11)$$

Φ — коэффициент фотоэлектрического преобразования.

В нулевом положении магнита датчика, когда ось магнита перпендикулярна измеряемой компоненте, световой поток, отраженный от зеркала магнитной системы датчика, делится специальной диафрагмой на две примерно равные части. Одна часть проходит к фотоприемнику (фотоэлементу или фотомножителю), другая — задерживается диафрагмой. Так как вариации магнитного поля Земли представляют собой случайный процесс, то отклонения светового луча в обе стороны от его нулевого положения являются равновероятными.

Магнитометр с фотоэлектрическим преобразователем перестает работать, если световой поток полностью попадает в отверстие диафрагмы или полностью задерживается диафрагмой. Следовательно, ширина светового индекса в плоскости диафрагмы в направлении его перемещения определяет динамический диапазон магнитометра с фотоэлектрическим преобразованием.

Способы стабилизации магнитометров с фотоэлектрическим преобразованием

Простые схемы магнитометров с фотоэлектрическим преобразованием, подобные тем, которые изображены на рис. 1, известны сравнительно давно. Однако они не получили широко-

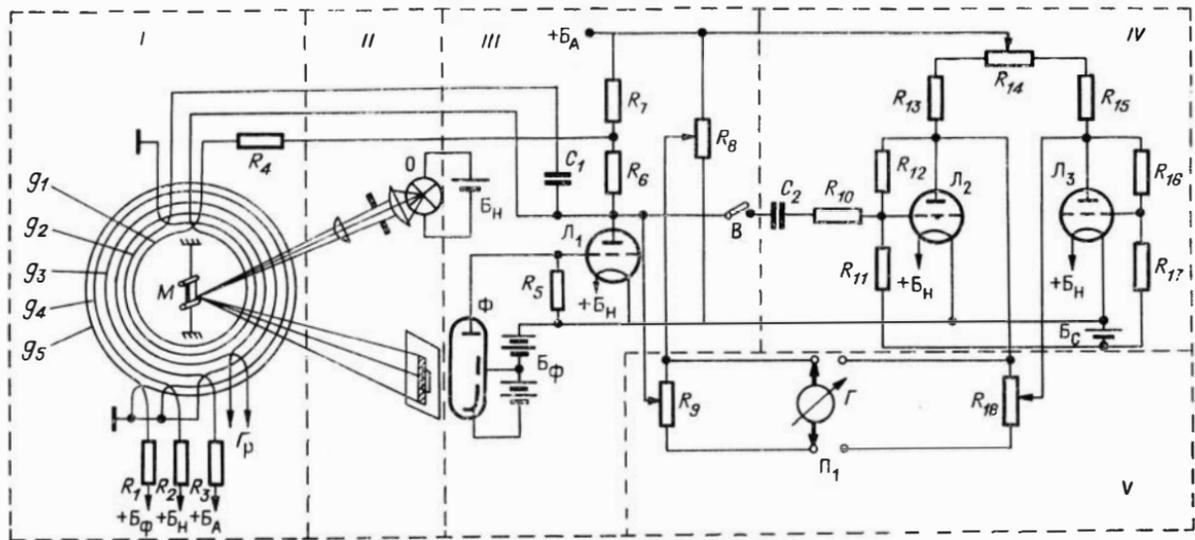


Рис. 4. Принципиальная схема высокочувствительного магнитного канала микровариационной станции ГГ42.

Демпфирование магнитометра осуществляется с помощью катушки g_2 , намотанной на том же каркасе, что и обмотка g_1 . Демпфирование, вводимое таким способом, является, по существу, магнитным, поскольку на датчик воздействует магнитное поле катушки g_2 , пропорциональное скорости первичного сигнала. Достоинство такого способа демпфирования состоит прежде всего в том, что с помощью несложной регулировки одного из параметров демпфирующей цепи удастся обеспечить любой заданный режим демпфирования: критический, аperiодический и т. д. При наличии высокостабильных источников питания магнитометр ЛГУ работает устойчиво и без существенного дрейфа нуля.

Нестабильность питающих напряжений проявляется в первую очередь в дрейфе нуля-пункта магнитометра. Этот дрейф не удастся полностью исключить даже путем введения глубокой обратной отрицательной связи. Следует заметить, что глубокую обратную связь по магнитному полю, близкую к 100%, вводить нельзя, главным образом вследствие большой потери чувствительности и возможного самовозбуждения магнитометра.

На рис. 4 показана схема высокочувствительного магнитного канала микровариационной станции ГГ42. В этой схеме помимо рассмотренных стабилизирующих устройств — обратной отрицательной связи и демпфирования по магнитному полю — введены стабилизирующие обмотки g_3 , g_4 , g_5 , с помощью которых удастся избавиться от влияния питающих напряжений в допустимых пределах их изменений. При дальнейшем анализе высокочувствительного магнитного канала мы будем исходить из схемы, показанной на рис. 4. Основные звенья этой схемы обведены пунктирными линиями: I звено — датчик с набором стабилизирующих катушек; II — оптическая система; III — схема фотоэлектрического преобразования; IV — фильтры короткопериодических колебаний; V — гальванометрический регистратор.

Магнитометры, построенные по принципу фотоэлектрического преобразования, два из которых показаны на рис. 3 и 4, будем называть в дальнейшем магнитными микровариометрами или просто — микровариометрами.

Основные конструктивные элементы микровариометров и требования, предъявляемые к ним

Датчики. Общим элементом любого датчика магнитостатического типа является магниточувствительная система, состоящая из одного или двух постоянных магнитов и жестко связанного с ним зеркала.

Форму магнитов для вариационных приборов выбирают обычно цилиндрическую с отношением длины магнита к его диаметру не менее 5.

В последнее время наиболее распространенным материалом для магнитов является магнитный сплав «викаллоу». Форма зеркала выбирается в виде плоского прямоугольника с отношением длины к ширине не менее 2—3.

Магниточувствительная система подвешивается либо на одной нити — унифиляре, либо на двух нитях — растяжках. Материалом для нитей служит плавленный кварц, фосфористая и бериллиевая бронза и другие сплавы. Существующая технология изготовления кварцевых нитей позволяет делать их только круглого сечения. В магнитометрии используются кварцевые нити диаметром от 5 до 50 мк. Металлические подвесы и растяжки выпускаются промышленностью чаще всего в виде лент. Для магнитных датчиков используются подвесы и растяжки с моментом кручения от 0,01 до 0,1 мг·см/90°. Детальное описание конструкции датчика приведено в главе VI.

Оптическая система. Оптика в микровариометре служит для передачи сигналов от датчика к фотопреобразователю с помощью световых лучей. Оптическая система в микровариометре должна удовлетворять двум основным требованиям: передавать сигналы без искажений и наиболее рационально использовать световой поток, излучаемый осветительной лампой.

В микровариометрах используются два способа проектирования светового потока в плоскости диафрагмы фотоприемника: в первом случае фокусируется тело накала лампы, во втором случае — светящееся отверстие коллиматорной диафрагмы. Способ проекции светящегося отверстия следует считать более удобным, так как он позволяет получить широкий и однородный световой пучок, захватывающий большую площадь фотокатода. Кроме того, форма сечения пучка в этом способе может быть задана. Вследствие интегрального эффекта широких световых пучков улучшается линейность работы фотопреобразователя.

К осветительным лампам предъявляются высокие требования в отношении их оптических свойств и экономичности. В способе проекции светящихся отверстий тело накала лампы должно иметь малые размеры (точечный источник) и занимать центральное положение в колбе лампы. В случае фокусировки тела накала оно должно иметь большие размеры и правильную геометрическую форму.

По соображениям экономичности используют лампы малой мощности — 0,5—1,0 вт. При меньшей мощности осветительной лампы требуется чувствительный фотоприемник, напри-

мер многокаскадный фотоумножитель. Однако этот вариант вряд ли может быть удачным вследствие увеличения громоздкости схемы и сложности ее питания. Вариант оптической схемы, который применен в магнитометре ГГ42, показан на рис. 5.

Фотопреобразователи. В качестве фотопреобразователей магнитометров используются только вакуумные фотоэлементы и фотоумножители. Газонаполненные фотоэлементы не применяются вследствие их меньшей стабильности по сравнению с вакуумными.

Из фотоумножителей предпочтение отдается фотоумножителям с небольшим числом каскадов с большой площадью фотокатода, например ФЭУ-1, ФЭУ-2.

Наконец, малоприменимыми в качестве фотопреобразователей следует считать фотоэлементы с внутренним фотоэффектом — фотосопротивления и вентильные фотоэлементы: они имеют низкую стабильность по сравнению с вакуумными фотоэлементами.

Электронные лампы. Электронные лампы используются в усилительных каскадах. Вход первого усилителя (рис. 4) гальванически связан с анодом фотоумножителя. Этот каскад предназначен для согласования высокоомной цепи фотоумножителя с низкоомной цепью регистрирующего гальванометра.

Между первым каскадом усиления и гальванометром иногда включают фильтр верхних частот с дополнительным усилителем. В усилительно-преобразовательных каскадах до сих пор используются электронные лампы. С появлением полевых транзисторов возникла реальная возможность перехода к полупроводниковым преобразователям.

К мощности электронных ламп жестких требований не предъявляется. Предпочтение отдается экономичным лампам с большой крутизной анодно-сеточной характеристики.

Гальванометрический регистратор. Регистрирующий гальванометр выбирается исходя из следующих требований:

а) гальванометр не должен вносить частотных искажений сигналов, поступающих от датчика. Для этого необходимо сле-

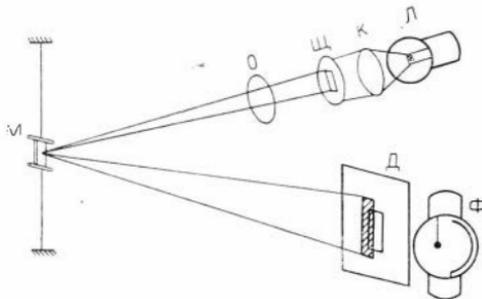


Рис. 5. Вариант оптического преобразователя, применяемого в станции типа ГГ42.

дующее условие: частота собственных колебаний гальванометра должна быть несколько больше, чем у датчика;

б) гальванометр должен обладать максимально возможной чувствительностью по току для того, чтобы иметь возможность компенсировать недостаток чувствительности самого магнитометра при работе с глубокой обратной отрицательной связью.

Чувствительность микровариометров

Чувствительность — важнейшая характеристика магнитометра. Обычно пользуются понятием статической чувствительности, которая определяется величиной установившегося отклонения указателя магнитометра на единицу поля, изменяющегося скачком.

В нормальном магнитографе чувствительность вычисляется как отношение линейного перемещения светового индекса Δn , находящегося на расстоянии l от датчика, к величине действующего поля ΔH :

$$c_0 = \frac{\Delta n}{\Delta H} \left[\frac{м.м}{\gamma} \right]. \quad (12)$$

Чувствительность магнитометра с фотоэлектрическим преобразованием определяется отношением приращения тока ΔI на выходе усилителя к величине приращения поля

$$c = \frac{\Delta I}{\Delta H} \left[\frac{м.а}{г.а.м.а} \right]. \quad (13)$$

Нормальный магнитограф является частью магнитного микровариометра, и поскольку действующее поле ΔH для них одно и то же, то

$$c = c_0 \frac{\Delta I}{\Delta n} \left[\frac{м.а}{м.м} \right]. \quad (14)$$

Соотношение (14) показывает связь между чувствительностями нормального магнитографа и микровариометра. Отношение $\frac{\Delta I}{\Delta n}$ определяет приращение тока на выходе микровариометра на единицу перемещения светового индекса датчика и может быть названо коэффициентом фотоэлектрического преобразования

$$\Phi = \frac{c}{c_0} = \frac{\Delta I}{\Delta n}. \quad (15)$$

На примере простейшей схемы микровариометра (рис. 4) выясняем, из каких параметров складывается коэффициент Φ . Счи-

таем, что ΔI — изменение анодного тока электронной лампы, которое связано с величиной напряжения на управляющей сетке лампы ΔU_g следующим образом:

$$\Delta I = S_d \Delta U_g, \quad (16)$$

где S_d — динамическая крутизна анодно-сеточной характеристики лампы.

Величина ΔU_g создается изменением фототока Δi_ϕ , протекающего через сопротивление R :

$$\Delta U_g = R \Delta i_\phi. \quad (17)$$

В свою очередь

$$\Delta i_\phi = \gamma \Delta F = k \gamma J \frac{h \Delta n}{l^2}, \quad (18)$$

где γ — чувствительность фотоэлемента (фотоумножителя) в $ма/лм$; ΔF — световой поток в люменах; k — коэффициент сжатия светового потока в коллиматоре осветителя; J — сила света осветителя в люксах; h — высота отверстия прямоугольной диафрагмы фотоприемника в миллиметрах; l — расстояние хода светового луча в миллиметрах; величина $\frac{h \Delta n}{l^2}$ представляет собой величину телесного угла, под которым видно приращение площади сечения светового потока $h \Delta n$ на расстоянии l .

Подставляя последовательно (16), (17) и (18) в (15), получаем:

$$\Phi = k R \gamma S_d J \frac{h}{l^2}. \quad (19)$$

Коэффициент фотоэлектрического преобразования зависит, следовательно, от многих параметров. Важнейшим из них безусловно является сопротивление R . Поскольку величина фототока в цепи фотоэлемента (или фотоумножителя) слабо зависит от величины сопротивления R , то оно может быть выбрано очень большим. Благодаря этому удастся получить большое усиление по току (а следовательно, и высокую чувствительность микровариометра) с помощью только одной электронной лампы.

Чувствительность микровариометра при включении обратной отрицательной связи уменьшится и, как показано ниже, будет определяться следующим соотношением:

$$c' = \frac{c_0 \Phi}{1 + c_0 \Phi \beta}, \quad (20)$$

где β — коэффициент обратной связи. Для случая включения катушки обратной связи, показанного на рис. 3, $\beta = g_1$, где g_1 — постоянная катушки.

Чувствительность нормального магнитографа c_0 пропорциональна длине оптического рычага l , тогда из (10) следует, что чувствительность микровариометра обратно пропорциональна l . Эта важная в практическом отношении особенность микровариометров позволяет конструировать весьма компактные приборы.

Приведем пример расчета чувствительности, исходя из следующих данных $k=20$; $R=2 \cdot 10^7$ ом; $\gamma = 0,5 \frac{ма}{лм}$,

$$S_d = 10^{-3} \frac{ма}{мв}; \quad I = 0,1 \text{ лк}; \quad h = 10 \text{ мм};$$

$$l = 200 \text{ мм}; \quad c_0 = 0,02 \frac{мм}{гамма}$$

Чувствительность без обратной связи будет:

$$c = c_0 \Phi = 0,02 \frac{мм}{\gamma} \cdot 5 \frac{ма}{мм} = 0,1 \frac{ма}{гамма}$$

Чувствительность при включении обратной отрицательной связи при $\beta = 200 \frac{гамма}{ма}$ согласно (20):

$$c' = \frac{c_0 \Phi}{1 + c_0 \Phi \beta} = 0,005 \frac{ма}{гамма}$$

Пороговая чувствительность микровариометров

Не представляет особого труда выбрать параметры, входящие в (19), так, чтобы чувствительность c стала сколь угодно высокой. На практике, однако, приходится ограничиваться так называемой пороговой чувствительностью c_n , обратная величина которой — ϵ_n условно принимается за средний уровень шумов в схеме микровариометра, т. е.

$$\epsilon_n = \overline{dH}_{ш}. \quad (21)$$

Логарифмируя и дифференцируя формулу (15), получаем

$$\frac{dc}{c} = \frac{dc_0}{c_0} + \frac{d\Phi}{\Phi}. \quad (22)$$

Изменение чувствительности, определяемое (22), равносильно изменению сигнала на входе микровариометра, поэтому (22) можно переписать в виде

$$\frac{dH}{H} = \frac{dc_0}{c_0} + \frac{d\Phi}{\Phi}. \quad (23)$$

Соотношение (23) определяет относительную погрешность измерения поля, обусловленную нестабильностью параметров микровариометра. Слагаемое $\frac{dc_0}{c_0}$ характеризует погрешность измерения за счет датчика, $\frac{d\Phi}{\Phi}$ — относительная погрешность измерения за счет фотоэлектрического преобразователя.

Согласно (19)

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = \frac{dR}{R} + \frac{d\gamma}{\gamma} + \frac{dS_d}{S_d} + \frac{dl}{l} + \frac{dh}{h} + 2 \frac{dl}{l}. \quad (24)$$

Оценим величину каждого из слагаемых (24), представляющих относительный уровень флуктуаций (шумов) параметров фотоэлектрического преобразователя. При оценке величины шумовых эффектов этих параметров не учитываются их медленные изменения (дрейф нуля), происходящие вследствие изменений температуры, напряжения источников питания и т.п. Вклад каждого слагаемого в (24) неодинаков. Можно, например, пренебречь двумя последними слагаемыми, поскольку оптические размеры h и l практически не флуктуируют.

Отношение $\frac{dR}{R}$ эквивалентно относительному изменению величины напряжения U_R , падающему на сопротивлении R :

$$\frac{dR}{R} = \frac{\sqrt{\overline{dU_{ш}^2}}}{U_R}, \quad (25)$$

$\overline{dU_{ш}^2}$ — среднеквадратичное значение э.д.с., обусловленной шумовыми эффектами сопротивления R .

Величина $\overline{dU_{ш}^2}$ складывается из двух компонент шума: во-первых, из компоненты шумов, возникающих вследствие теплового хаотического движения носителей зарядов, и описываемой соотношением Найквиста

$$dU_{ш.т}^2 = 4kTR\Delta f \quad (26)$$

и, во-вторых, из компоненты шумов, возникающих вследствие изменения самого сопротивления, когда по нему течет ток. Эту компоненту шумов называют «токовыми шумами». Среднеквадратичное значение токовых шумов определяется выражением, эквивалентным [12]:

$$\overline{dU_{шR}^2} = BR^2 I^2 \ln \frac{f_1}{f_2}. \quad (27)$$

Входящие в формулы (26) и (27) параметры означают: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ — постоянная Больцмана; T — темпера-

тура по шкале Кельвина; $\Delta f = f_1 - f_2$ — диапазон частот, g ; $B = 10^{-9} \div 10^{-13}$ — коэффициент, зависящий от типа сопротивления.

Необходимым условием нормальной работы микровариометра является протекание через сопротивление R довольно значительной по величине постоянной составляющей фототока фотоумножителя или фотоэлемента (до 0,5—1,0 $\mu\text{ка}$). Вследствие этого компонента токовых шумов $\overline{dU}_{\text{шР}}$ оказывается примерно на порядок больше величины классического контурного шума, обусловленного чисто тепловыми эффектами и определяемого по формуле Найквиста.

Следовательно, из (27) получим

$$\frac{dR}{R} \approx \frac{\sqrt{BR^2 I^2 \ln f_1/f_2}}{RI}, \quad (28)$$

где I — средняя величина фототока, протекающего через сопротивление R ; $RI = U_R$ — падение напряжения на сопротивлении R .

Выбирая крайне неблагоприятный случай, когда $B = 10^{-9}$, и принимая отношение крайних частот $\frac{f_1}{f_2} = 10^5$, получим:

$$\frac{dR}{R} = 10^{-4}.$$

Отношение $\frac{d\gamma}{\gamma}$ характеризует нестабильность фотоумножителя или фотоэлемента. Цепь фотоумножителя можно заменить эквивалентным сопротивлением, для которого справедливы соотношения (26) и (27). Как и для обычных сопротивлений, по которым течет ток, в анодной цепи фотоумножителя преобладают токовые шумы.

Существенное значение на стабильность фотоэлементов и фотоумножителей оказывает термоэлектронная и фотоэлектронная эмиссия фотокатода, которая образует так называемый «темновой ток». От непостоянства температуры и других факторов величина темнового тока будет меняться. На стабильность фотоэлементов и фотоумножителей оказывают влияние условия их эксплуатации (интенсивность засветки, продолжительность работы) и условия хранения до эксплуатации.

Путем прямых измерений было установлено, что относительный уровень флуктуаций фототока для различных экземпляров фотоумножителей типа ФЭУ-2 колеблется в пределах от 10^{-5} до $2 \cdot 10^{-4}$. Причем для одного и того же экземпляра отно-

шение средней величины флуктуаций фототока к величине полного фототока оказывается весьма стабильным:

$$\frac{di_{\Phi}}{i_{\Phi}} \approx \text{const},$$

т. е. шумы приблизительно пропорциональны величине фототока, что, в общем, подтверждает предположение о преобладающих в цепи фотоэлемента токовых шумов.

Измерения величины $\frac{di_{\Phi}}{i_{\Phi}}$ проводилось также для различных типов фотоэлементов и фотоумножителей: Ф-1, СЦВ-3, СЦВ-4, ФЭУ-20 и др. Предполагалось, что среди них могут оказаться более стабильные типы, чем ФЭУ-2. Однако результаты измерений давали тот же интервал величин: $10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-4}$.

Стабилизация чувствительности фотоэлемента — технически трудная задача, ибо требует глубокого охлаждения фотокатода. Это осуществимо лишь в установках лабораторного типа. Что касается микровариометров, которые предназначены для работы в полевых условиях, то для них единственно возможным способом уменьшения шумов является отбор лучших экземпляров, например таких, у которых относительная нестабильность не превышает 10^{-4} . В главе VIII рассмотрен один из способов отбраковки фотоумножителей с неудовлетворительными параметрами.

Слагаемое $\frac{dS_d}{S_d}$ в формуле (24) эквивалентно отношению среднего уровня флуктуаций анодного тока к полному анодному току электронной лампы.

При соблюдении высоких требований постоянства источников питания нестабильность S_d определяется в основном внутриламповыми шумами.

В усилителях медленноизменяющихся сигналов преобладает компонента шумов, обусловленная «фликкер-эффектом» или эффектом «мерцания» катода. Непосредственные измерения флуктуаций анодного тока электронных ламп дают величины, не превышающие $5 \cdot 10^{-8}$. При средней величине анодного тока, равной $5 \cdot 10^{-3}$ а, будем иметь

$$\frac{dS}{S} = 10^{-5}.$$

Оценим, наконец, слагаемое $\frac{dJ}{J}$. Флуктуации интенсивности свечения электрических ламп накаливания могут вызываться явлениями, подобными «фликкер-эффекту» у электронных

ламп и нестабильностью источников питания. Данные о флуктуациях силы света электрических ламп, обусловленных свойствами нитей накаливания, отсутствуют. Известно, однако, что сила света изменяется пропорционально четвертой степени питающего напряжения, т. е. $\Delta J = k(\Delta U)^4$, поэтому $\frac{dJ}{J} = 4 \frac{dU}{U}$.

Полагая $\frac{dU}{U} = 10^{-5}$ для напряжения аккумуляторных батарей, получим

$$\frac{dJ}{J} = 4 \cdot 10^{-5}.$$

Можно приблизительно считать, что влияние нитей накаливания дает величину того же порядка. Суммарно нестабильность источника света можно, следовательно, оценить весьма приближенно величиной

$$\frac{dJ}{J} = 10^{-4}.$$

Суммируя оценки по всем параметрам, получим, что относительная погрешность, вносимая элементами фотоэлектрического преобразователя, может достигать величины $5 \cdot 10^{-4}$ (если не приняты меры по более тщательному отбору элементов схемы с малым уровнем шумов).

Приведенные данные о шумах относятся к схеме микроварпометра без обратной связи. Ниже будет показано, что при наличии обратной отрицательной связи влияние параметров схемы уменьшается в $1 + \sigma\beta$ раз (при номинальной глубине обратной отрицательной связи — примерно в 10 раз). Следовательно, полученную выше оценку общей нестабильности фотоэлектрического преобразователя следует уменьшить на порядок

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = 5 \cdot 10^{-5}.$$

Оценивая погрешности измерения магнитных полей, вносимые датчиком, чаще всего ограничиваются изучением медленных обратимых и необратимых процессов, существующих в самом датчике. Это и понятно: медленные изменения, которые называют также «дрейфом нуля», за большие промежутки времени могут создавать значительные искажения измеряемых величин.

Шумовые эффекты типа «броуновского движения» в деталях датчика изучены пока недостаточно. Однако по имеющимся сведениям влияние этих шумов находится за пределами чувствительности микровариометров. В эквивалентном выражении уровень шумов данного типа не превосходит 10^{-9} э [82].

Значительно большее влияние на точность измерений оказывают механические колебания подвижных элементов датчика. В последние годы разработаны такие конструкции датчиков, которые слабо подвержены влиянию механических помех. К таким датчикам следует отнести системы на растяжках и особенно системы, работающие на раскрученных растяжках. Разработаны также различные демпфирующие устройства. Можно поэтому считать, что флуктуации датчиков вносят в измерения значительно меньшие погрешности, чем флуктуации параметров фотоэлектрического преобразования, т. е. можно положить

$$\frac{dH}{H} \cong 5 \cdot 10^{-5}. \quad (29)$$

Величина dH представляет собой абсолютную погрешность микровариометра, которая по определению (21) численно приравнивается пороговой цене деления ϵ_n . Предельный переход от произвольного значения ϵ к его пороговому значению ϵ_n приводит, согласно (29), к необходимости рассматривать не любой измеряемый сигнал H , а его предельное значение для данного микровариометра. В качестве предельного значения H выбираем такой сигнал, который определяет динамический диапазон микровариометра, т. е. при котором сохраняется еще линейность измерительного канала. Тогда из (29) получаем следующую эмпирическую связь между пороговой ценой деления и динамическим диапазоном микровариометра H_d :

$$\epsilon_n = 5 \cdot 10^{-5} H_d. \quad (30)$$

Обычно динамический диапазон устанавливается в соответствии с максимально возможной интенсивностью вариаций (исключая случаи особо сильных возмущений — типа магнитных бурь). Для средних широт нормальная интенсивность геомагнитных вариаций не превышает 100 *гамм*. Выбирая динамический диапазон равным удвоенной амплитуде возможных вариаций, т. е. с учетом равновероятной возможности увеличения или уменьшения поля, получим

$$\epsilon_n = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 200 = 0,01\gamma.$$

При необходимости получить меньшее значение ϵ_n следует уменьшить соответственно H_d , что достигается изменением угловой чувствительности датчика, например, путем изменения глубины обратной отрицательной связи по магнитному полю.

В северных широтах, где средний уровень геомагнитных вариаций более высок и достигает 1000 *гамм* и более, необходимо увеличить динамический диапазон путем соответствующего заглубления датчика.

В VIII главе будет рассмотрен практический способ оценки уровня внутренних шумов в магнитном канале, а следовательно, и пороговой цены деления, справедливый при любом значении динамического диапазона.

**СТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА
МАГНИТОМЕТРОВ
С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ**

Обратная связь по магнитному полю

Особенностью обратной связи по магнитному полю является то, что сигнал с выхода поступает в цепь обратной связи в виде напряжения или тока и подается на вход в виде магнитного поля. Для преобразования электрического сигнала в магнитный используется катушка Гельмгольца, которая включается в цепь обратной связи. Таким образом, обратная связь охватывает все элементы микровариометра, включая датчик. Достоинства такого способа введения обратной отрицательной связи следующие: а) уменьшается влияние нестабильности элементов фотоэлектрического преобразователя; б) датчик, находящийся в поле обратной отрицательной связи, приобретает устойчивое равновесие. Несмотря на то, что чувствительность микровариометра примерно на два порядка выше, чем чувствительность нормального магнитометра, датчик в первом случае оказывается более устойчивым. Это обстоятельство значительно упрощает методику регистрации магнитных полей в экспедиционных условиях.

На рис. 6 показан один из способов введения обратной связи по магнитному полю. Напряжение выходного сигнала снимается с сопротивления R_1 и подается в цепь R_0, g_1 . Ток через

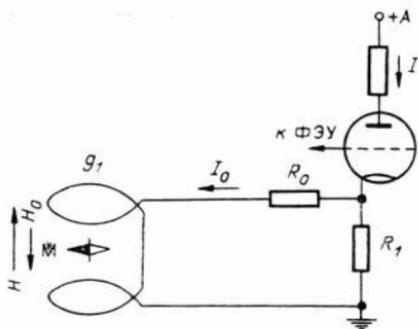


Рис. 6. Способ включения катушки типа колец Гельмгольца в цепь обратной связи по магнитному полю.

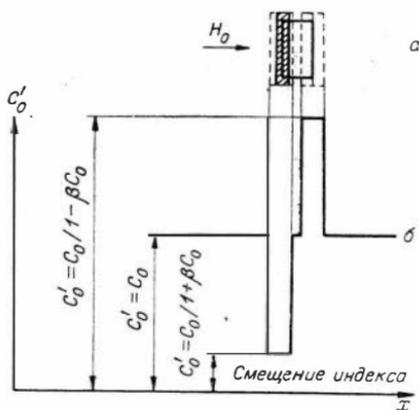


Рис. 7. Три области равновесия магнитной системы датчика в поле колец обратной связи:

a — расположение светового индекса датчика около отверстия диафрагмы фотоприемника *b* — изменение чувствительности датчика в зависимости от знака обратной связи.

катушку g_1 может регулироваться сопротивлением R_0 . Если I_0 — ток в катушке g_1 , то магнитное поле обратной связи будет

$$H_0 = g_1 I_0, \quad (31)$$

g_1 — постоянная катушки в точке, где находится магнит датчика (обычно магнит располагается в центре катушки).

Пусть магнитное поле изменяется на величину H ; предположим также, что обратная связь не введена: катушка g_1 — отключена. Тогда ток через J лампу изменится на величину I . Отношение $\frac{H}{I} = \varepsilon$ представляет цену деления микровариометра без обратной связи. При подключении катушки g_1 в ней создается поле H_0 , которое будет в фазе или противофазе с полем H . Новое значение цены деления будет:

$$\varepsilon' = \frac{H \pm H_0}{I}. \quad (32)$$

Введем обозначение $\frac{H_0}{I} = \beta$, где β — коэффициент обратной связи, тогда

$$\varepsilon' = \varepsilon \pm \beta. \quad (33)$$

Знаки \pm соответствуют отрицательной и положительной обратной связи. Из параметров схемы найдем

$$I_0 = I \frac{R_1}{R_1 + R_0}. \quad (34)$$

Согласно определению (31),

$$H_0 = g_1 \frac{R_1}{R_1 + R_0} I \quad (35)$$

и (33) будет иметь вид

$$\varepsilon' = \varepsilon \pm g_1 \frac{R_1}{R_1 + R_0}. \quad (36)$$

В случае глубокой отрицательной связи выполняется неравенство

$$\varepsilon \ll g_1 \frac{R_1}{R_1 + R_0},$$

т. е. цена деления определяется только параметрами цепи обратной связи.

Перейдя от цены деления к чувствительности, перепишем (33) в виде

$$c' = \frac{c}{1 \pm c\beta}. \quad (37)$$

Это выражение имеет тот же вид, что и формула для коэффициента усиления усилителя, охваченного обратной связью

$$K' = \frac{K}{1 \pm K\beta}, \quad (38)$$

K — коэффициент усиления без обратной связи. Отличие (37) и (38) в том, что в формуле (38) все величины безразмерны, а в (37) входят размерные величины; c измеряется в a/α , β — в α/a .

Рассмотрим стабилизирующие свойства обратной отрицательной связи по магнитному полю.

а) Работа датчика. Изучение физических процессов, происходящих при движении светового индекса датчика около отверстия диафрагмы фотоэлемента, показывает, что датчик, находящийся в поле катушки обратной связи, имеет три области равновесия, в которых устойчивость его различна. Это вытекает также из формулы (37), которую можно переписать в виде

$$c'_0 = \frac{c_0}{1 \pm c_0\beta}, \quad (39)$$

где c_0 и c'_0 — чувствительности датчика без обратной связи и с обратной связью.

Если световой индекс находится за пределами отверстия диафрагмы или полностью входит в отверстие, то фотоэлектрический преобразователь перестает работать и не оказывает влия-

нения на датчик. Эти области соответствуют «безразличному» равновесию магнитной системы датчика. На рис. 7 этим областям отвечает уровень чувствительности датчика $s_0 = c_0$.

В микровариометре без обратной связи световой индекс может занимать любое положение около отверстия диафрагмы. В микровариометре, охваченном обратной отрицательной связью, положение индекса будет не безразличным: он может занять только одно определенное положение.

Пусть магнитное поле в кольцах обратной связи H_0 направлено слева направо, как показано на рис. 7, а. Движение светового индекса происходит в плоскости чертежа параллельно полю H_0 . Световой индекс установлен около левого края отверстия диафрагмы. В случае, если какая-либо вариация магнитного поля вызывает движение светового индекса вправо, т. е. в направлении H_0 , то это приведет к уменьшению тока I (имеется в виду схема с фотоумножителем), а следовательно, и к уменьшению H_0 . Вариация поля обратной связи стремится восстановить начальное положение индекса. То же самое будет происходить, если вариация внешнего поля направлена влево. Ток, и вместе с ним H_0 возрастут. Снова вариация поля H_0 направлена навстречу внешней вариации. В обоих случаях имеет место обратная отрицательная связь и устойчивое равновесие магнитной системы датчика.

Пусть индекс установлен у правого края отверстия диафрагмы. Поле обратной связи H_0 по-прежнему направлено слева направо. Пусть вариация поля направлена вправо. Это вызовет увеличение тока, а следовательно, и возрастание H_0 , т. е. вариация H_0 усилит внешнее возмущение, что в свою очередь еще больше увеличит ток. Процесс возрастания поля будет происходить лавинообразно до тех пор, пока индекс не будет вытолкнут за пределы отверстия диафрагмы. За пределами отверстия действие поля обратной связи прекращается, но вступает в действие сила упругости нити датчика, которая стремится возвратить индекс в исходное положение. Таким образом возникает генерация, т. е. неустойчивое положение датчика. Совершенно аналогично происходит процесс, если внешняя вариация отклоняет индекс влево: поле обратной связи будет изменяться лавинообразно до тех пор, пока индекс не окажется полностью в отверстии диафрагмы.

Следовательно, магнитная система датчика при движении индекса около отверстия диафрагмы проходит участки, на границах которых чувствительность изменяется скачком. Графически это показано на рис. 7, б.

Первый край отверстия в соответствии с рассмотренными

выше случаями отвечает области неустойчивого равновесия. Уровень чувствительности на этом участке определяется формулой $c'_0 = \frac{c_0}{1 - c_0\beta}$ и может принимать любые значения вплоть до бесконечности и даже заходить в область отрицательных значений. Переход к отрицательным значениям чувствительности может рассматриваться лишь формально и служить главным образом критерием перехода датчика в неустойчивое состояние.

Левый край отверстия отвечает области устойчивого равновесия или области «потенциальной ямы». Уровень чувствительности датчика определяется здесь формулой $c'_0 = \frac{c_0}{1 + c_0\beta}$; c'_0 может принимать значения от c_0 до нуля.

При своем движении магнитная система стремится попасть в область «потенциальной ямы». Установка датчика микроварпометра в заданное рабочее положение происходит автоматически, достаточно лишь привести магнитную систему в движение механическим толчком или магнитным импульсом. Для полевых микроварпометров, работающих, как правило, вне помещений, способность датчика устанавливаться автоматически значительно облегчает эксплуатацию этих приборов в отличие, например, от нормальных магнитографов, настройка которых довольно сложна и требует обязательного затемнения прибора.

б) Как и в электронных усилительных устройствах обратная отрицательная связь стабилизирует чувствительность микроварпометра. Можно найти, что относительная неустойчивость чувствительности микроварпометра с обратной отрицательной связью уменьшается в $1 + \beta c'$ раз, т. е.

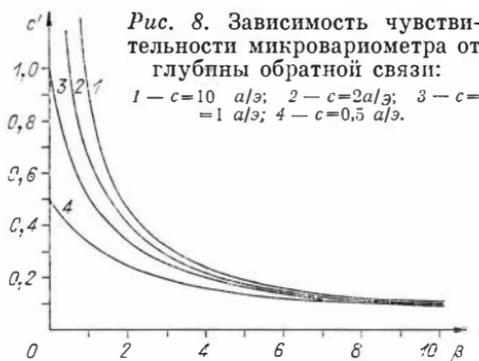
$$\frac{dc'}{c'} = \frac{dc}{c} \frac{1}{1 + \beta c'}. \quad (40)$$

Во столько же раз снижается влияние шумов, дрейфа нуля и других дестабилизирующих факторов. В случае глубокой отрицательной связи ($\beta c' \gg 1$) будем иметь: $c' \approx \frac{1}{\beta}$; при этом чувствительность микроварпометра практически не зависит от его параметров, а лишь от параметров цепи обратной связи, стабильность которых достаточно высока.

На рис. 8 показана зависимость c' от коэффициента обратной связи β при разных c .

в) Обратная связь оказывает влияние на частоту собственных колебаний магнитной системы датчика.

Известное уравнение движения магнитной системы, имею-



щей момент инерции J , магнитный момент магнита M и удельный противодействующий момент нити G , записывается в следующем виде:

$$J\ddot{\varphi} + P\dot{\varphi} + G\varphi = MH, \quad (41)$$

где φ , $\dot{\varphi}$ и $\ddot{\varphi}$ — соответственно угловое отклонение, угловая скорость и угловое ускорение магнита датчика; P — степень ус-

покоения подвижной системы; H — внешнее возмущающее поле.

В случае включения катушки обратной связи уравнение (41) будет иметь вид

$$I\ddot{\varphi} + P\dot{\varphi} + G\varphi = M(H - H_0). \quad (42)$$

Знак — перед H_0 соответствует отрицательной обратной связи.

Учтя пропорциональность между углом отклонения магнита φ и изменением тока I на выходе микровариометра ($I = k\varphi$), перепишем (35) в виде $H_0 = kg_1 \frac{R_1}{R_1 + R_0} \varphi$ и подставим в (42).

$$\ddot{\varphi} + 2h\dot{\varphi} + \left(\omega_0^2 + kg_1 \frac{R_1}{R_1 + R_0} \frac{M}{J} \right) \varphi = \frac{M}{J} H; \quad (43)$$

$2h = \frac{p}{J}$ — коэффициент затухания датчика; $\omega_0 = \sqrt{\frac{G}{J}}$ — циклическая частота собственных колебаний датчика без обратной связи.

Новое значение частоты собственных колебаний датчика из (43)

$$\omega'_0 = \sqrt{\omega_0^2 + kg_1 \frac{R_1}{R_1 + R_0} \frac{M}{J}}. \quad (44)$$

Частота ω'_0 возрастает с увеличением глубины обратной отрицательной связи.

При рассмотрении свойств обратной отрицательной связи по магнитному полю мы полагали, что фазовые искажения в электрической схеме фотоэлектрического преобразователя отсутствуют и поэтому считали, что обратная отрицательная связь передает сигнал H_0 на вход строго в противофазе по от-

ношению к сигналу H . Если в микровариометре имеются фазосдвигающие цепи, то на некоторой частоте отрицательная обратная связь может стать положительной и произойдет самовозбуждение. Такой фазосдвигающей цепью может быть высокоомное входное сопротивление усилителя, шунтированное емкостью монтажа или кабеля, подводящего сигнал к сетке лампы.

Условия самовозбуждения микровариометра через цепь обратной связи подробно рассмотрены Н. В. Липской и Б. Е. Брюнелли [16, 49]. На практике, однако, наблюдается только единственная возможность самовозбуждения: когда емкость-сетка лампы — земля достаточно велика. Чтобы избежать этого, необходимо соблюсти следующее требование: провод, идущий от фотоэлемента к управляющей сетке лампы, не должен быть длинным.

Демпфирование микровариометра

Демпфирование в нормальном вариометре осуществляется за счет взаимодействия магнита с полями вихревых токов, возбуждаемых магнитом в охватывающем его ограничителе.

Этот способ, пригодный для вариометров, предназначенных для записи сравнительно медленных процессов, оказывается недостаточно эффективным для микровариометра при регистрации им быстрых вариаций. Иногда применяют жидкостное демпфирование, однако этот способ связан со многими техническими трудностями, возникающими при подборе необходимого коэффициента вязкости, при конструировании самого датчика и т. п. Кроме того, наличие в датчике жидкости, вязкость которой зависит от температуры, является дополнительным дестабилизирующим фактором. В магнитометрах с фотоэлектрическим преобразованием оказалось возможным применить простой способ демпфирования с помощью дифференцирующей электрической цепи, в которую включены кольца Гельмгольца. Этот оригинальный способ осуществлен впервые в геомагнитной лаборатории ЛГУ по предложению Б. Е. Брюнелли.

Как известно, коэффициент при первой производной в уравнении движения любой колебательной системы характеризует степень успокоения этой системы. В указанном способе этот коэффициент может изменяться за счет параметров электрической схемы микровариометра и создавать практически любой режим затухания. На рис. 9 показан возможный вариант включения демпфирующей цепочки, состоящей из сопротивления R_a , конденсатора C и катушки Гельмгольца g_2 .

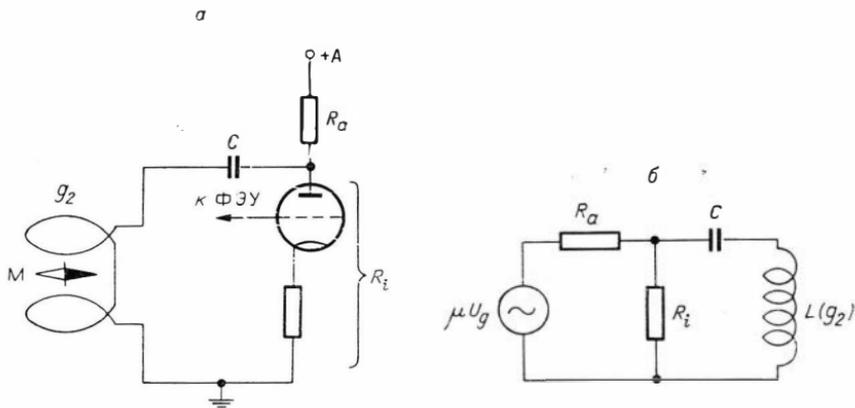


Рис. 9. Вариант включения демпфирующей катушки в схему микроамперметра:

a — принципиальная схема демпфирующей цепи микроамперметра; *b* — эквивалентная схема демпфирующей цепи.

Если изменение поля H вызывает протекание через лампу тока I , то в цепи затухания будет протекать ток

$$i_3 = C \frac{dU}{dt} = CR_a \frac{dI}{dt}, \quad (45)$$

$$i_3 \ll I_a.$$

В катушке g_2 возникнет поле

$$H_3 = g_2 CR_a \frac{dI_a}{dt}. \quad (46)$$

Уравнение движения магнитной системы при наличии демпфирующего поля H_3 запишется:

$$\ddot{\varphi} + 2h\dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = \frac{M}{J} (H - H_3). \quad (47)$$

Знак перед H_3 определяется направлением витков в катушке g_2 . Подставив (46) в уравнение движения и учтя пропорциональность между углом отклонения системы и током I ($I = k\varphi$), получим

$$\ddot{\varphi} + \left(\frac{2h + kg_2 R_a C M}{J} \right) \dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = \frac{M}{J} H. \quad (48)$$

Новый коэффициент затухания будет:

$$h' = \frac{2h + kg_2 R_a C M}{J}. \quad (49)$$

Комбинируя параметры R_a , C и g_2 , можно осуществлять необходимый режим демпфирования. Однако выбор параметров R_a , C и g_2 не может быть произвольным. Необходимо выбрать не только нужную величину произведения $R_a C g_2$, но и установить необходимые пропорции между сомножителями во избежание самовозбуждения схемы.

Цепь затухания можно рассматривать как частотно-зависимую обратную связь. Эквивалентная схема цепи затухания показана на рис. 9, б.

Ток i_3 , протекающий через катушку L , выражается следующим образом:

$$i_3 = \frac{U}{R_{\text{экв}} + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}, \quad (50)$$

где

$$R_{\text{экв}} = \frac{RiR_a}{Ri + R_a}.$$

Фаза тока определяется из выражения:

$$\varphi = \text{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R_{\text{экв}}}. \quad (51)$$

В рассматриваемом случае $R_{\text{экв}} = R_a$, а входящие в (51) параметры имеют следующие средние значения:

$$\omega = 10 \div 0,1 \frac{1}{\text{сек}}; \quad L \cong 10^{-3} \text{ гн}; \quad R_a \cong 10^4 \text{ ом}; \quad C \cong 2 \cdot 10^{-7} \text{ ф}.$$

Следовательно, $\omega L \ll \frac{1}{\omega C}$ для рассматриваемого диапазона частот, и

$$\varphi = - \text{arctg} \frac{1}{\omega R_a C}. \quad (52)$$

Затухание для собственной частоты ω_0 будет оптимальным, если

$$\omega_0 R_a C \ll 1, \quad \text{т. е. } \varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}.$$

Для более высоких частот это условие может быть не выполнено, если кроме того C и R_a относительно велики. Тогда $\varphi \rightarrow 0$ и цепь затухания превращается в положительную обратную связь.

Амплитуда генерации микровариометра будет зависеть от его частотной характеристики. Максимум амплитуды генерации, очевидно, будет иметь место на частоте резонанса ($\omega = \omega_0$). Для предотвращения генерации в подобной схеме

Необходимо уменьшать величину $R_a C$. Для сохранения же заданной величины H_3 следует увеличивать постоянную катушки g_2 .

Рассмотренный магнитный способ демпфирования особенно эффективен для датчиков, магнитная система которых подвешена на растяжках, так как такие датчики не имеют поперечных колебаний.

Режим демпфирования колебательных систем, как известно, оказывает существенное влияние на вид частотной характеристики в области частот, близких к резонансной.

Путем варьирования параметров демпфирующей цепи микровариометра можно легко осуществлять любой режим затухания.

Дрейф нулевого отсчета и способы его уменьшения

Геомагнитные вариации регистрируются на фоне большой постоянной составляющей магнитного поля, уровень которой на 3—5 порядков выше измеряемых величин поля. Поэтому к стабильности элементов микровариометра предъявляются высокие требования. Например, чтобы обеспечить погрешность измерения не более 0,01 *гаммы* в поле Земли 0,5 э ($5 \cdot 10^4$ *гамм*), стабильность датчика должна быть не хуже $2 \cdot 10^{-7}$, стабильность элементов фотоэлектрического преобразователя в микровариометре с динамическим диапазоном 200 *гамм* при той же точности измерения должна быть не хуже $5 \cdot 10^{-5}$.

Как было рассмотрено в главе I, шумовые эффекты параметров, т. е. сравнительно быстрые их флуктуации около какого-то среднего значения, позволяют обеспечить указанную выше точность измерений во всем частотном интервале микровариометра ($T = 1 \div 10^5$ *сек*).

По отношению к медленным изменениям параметров или «дрейфу нуля» микровариометра точность измерения не является одинаковой для разных частот. Так как величина дрейфа нуля возрастает со временем, то погрешность измерения будет расти с увеличением периода вариации*. Дрейф нуля так же, как и быстрые флуктуации микровариометра, значительно уменьшается при введении отрицательной обратной связи. Од-

* Следует указать на одну особенность геомагнитных вариаций. Их интенсивность сложным образом зависит от частоты, но, как правило, интенсивность вариаций в невозмущенные дни пропорциональна их периоду. Следовательно, относительная погрешность измерения, обусловленная дрейфом нуля, фактически может даже уменьшаться с увеличением периода вариации.

нако невозможно ввести стопроцентную обратную связь (чувствительность такого прибора равнялась бы нулю), и поэтому нельзя с помощью одной обратной отрицательной связи полностью избавиться от влияния нестабильности параметров микровариометра.

О температурном дрейфе нуля датчиков и способах его уменьшения можно прочесть в литературе [10, 78, 79]. Некоторые способы температурной компенсации датчиков будут описаны в главе V.

Рассмотрим источники дрейфа нуля в электрической схеме микровариометра. Такими источниками являются фотопреобразователь (фотоэлемент или фотоумножитель), усилительный ламповый каскад и осветитель.

а. В фотоэлементах и фотоумножителях происходят медленные необратимые процессы «старения», а также частично обратимые процессы утомления фотокатода и эмиттеров во время их работы.

Другой причиной изменения фототока при неизменной интенсивности облучения является существование в каждом фотоэлементе или фотоумножителе так называемого «темнового тока», образование которого связывается с термоэлектронной эмиссией фотокатода.

Установлено, что дрейф фототока происходит тем быстрее, чем интенсивнее засветка фотокатода. С целью ускорения процесса «старения» и других переходных процессов фотоэлементы и фотоумножители обычно подвергают «тренировке». В станции ГГ42 фотоумножители перед началом продолжительной работы облучают непосредственно в схеме световыми потоками, интенсивность которых в 2—3 раза превышает рабочую. У тренированных фотоумножителей дрейф фототока составляет около 15—20% за сутки. При наличии обратной отрицательной связи ($1 + c\beta = 10$) такое изменение фототока эквивалентно сползанию нуля-пункта прибора на 1,5—2% от величины динамического диапазона.

С целью предотвращения процесса «утомления» фотоумножителей в станции ГГ42 используются световые потоки, равномерно распределенные на значительной площади фотокатодов, причем интенсивность облучения фотокатодов примерно в 10 раз ниже допустимой нормы.

В многокаскадных фотоумножителях величина фототока заметно зависит от величины питающего напряжения. Для ФЭУ-2, используемых в станции ГГ42, эта зависимость в пределах номинального напряжения питания выражена слабо: изменение напряжения от 220 до 200 в лишь на 5% уменьшает фо-

тоток, а при наличии обратной отрицательной связи такое изменение фототока соответствует изменению сигнала на выходе не более 0,5% от величины динамического диапазона.

б. Дрейф нуля в усилительном ламповом каскаде связан с изменением параметров лампы, появлением утечек и с изменением напряжения питания. Согласно существующим данным, в образовании дрейфа анодного тока ламповых усилителей преобладающая роль принадлежит источникам питания. Среди многообразия схем усилителей постоянного тока с малым дрейфом нуля наиболее широко распространены балансные схемы, в которых два идентичных ламповых каскада включены в горизонтальную или вертикальную ветвь моста. Условием сохранения постоянства нуля-пункта в таких схемах является строгая идентичность параметров ламп и режимов их работы.

В микровариометре условие жесткого баланса выполнить не удастся в силу того, что амплитудный диапазон измеряемых вариаций чрезвычайно велик.

В магнитных каналах станции ГГ42 оказалось целесообразным применить одноламповую схему усиления, а компенсацию дрейфа нуля осуществить способом введения посредством катушек Гельмгольца стопроцентной обратной отрицательной связи по источникам питания. Сущность устройства, которое называется системой автоматической компенсации дрейфа нуля, будет рассмотрена ниже.

Возможность утечек в микровариометре устраняется комплексом конструктивных мер, о которых будет сказано в главе VI.

в. Изменение интенсивности свечения электрической лампы накаливания связано с медленным распылением нити накала и с непостоянством напряжения накала лампы.

Распыление нити происходит тем быстрее, чем выше приложенное к лампе напряжение. Эффективной мерой борьбы с этим явлением, которая и рекомендуется при эксплуатации микровариометра, является питание осветителя напряжением на 15—20% ниже номинального. При этом резко возрастает срок службы лампы, что также имеет немаловажное значение.

Однако основная причина нестабильности осветителя заключается в непостоянстве напряжения питания. На рис. 10, а кривая 3 обозначает зависимость интенсивности светового потока от величины приложенного напряжения. Изменение напряжения на 10% от номинального дает изменение светового потока на 35—40%.

На этом же рисунке показаны зависимости дрейфа нулевого отсчета микровариометра от напряжения на осветительной лам-

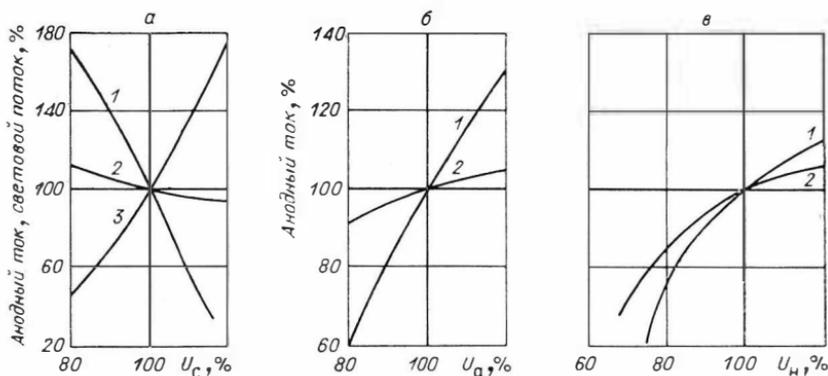


Рис. 10. Зависимости изменения анодного тока фотоэлектрического преобразователя от изменения питающих напряжений: а — по источнику света; б — по источнику анодного напряжения; в — по источнику накала электронной лампы.

пе. Номинальные значения параметров на графиках приняты за 100%. Кривая 1 снята без применения обратной связи и дает такое же процентное изменение анодного тока, как и кривая 3 для светового потока. После введения обратной отрицательной связи ($1 + \beta = 10$) дрейф анодного тока составляет не более 5% на 10% изменения напряжения на осветителе (кривая 2).

Очевидно, при более глубокой отрицательной связи дрейф нуля также будет снижаться, и если есть необходимый запас чувствительности, то этим путем можно достигнуть довольно высокой стабильности нуля-пункта. Практически все же коэффициент обратной связи не превышает 4—5 э/а (если чувствительность регистрирующего гальванометра ниже, чем 10^8 мм/а) и поэтому дрейф нуля будет составлять не менее 3% на 10% изменения питающего напряжения.

Для сравнения подобные же зависимости даны для источника анодного напряжения (рис. 10, б) и для источника накального напряжения (рис. 10, в) лампового усилителя. Кривые 1 относятся к микровариометру без обратной связи, кривые 2 — к микровариометру, охваченному обратной отрицательной связью ($1 + \beta = 10$). Из сравнения графиков видно, что дрейф нуля от напряжений, питающих усилитель, зависит слабее, чем от напряжения источника света. Тем не менее от анодного и накального напряжений дрейф анодного тока составляет около 2%, а в сумме с напряжением осветителя составит не менее 5%, что эквивалентно изменению сигнала на 10—15% при $N_d = 200\gamma$.

Уменьшить влияние питающих напряжений можно следую-

щими путями, которые обычно и используются в практике: 1) увеличением емкости питающих батарей; 2) повышением экономичности схемы. Первый способ малоприменим в полевом варианте аппаратуры, которая должна быть достаточно портативной. Второй путь возможен лишь до определенных пределов. В микровариационной станции ГГ42 был применен способ автокомпенсации дрейфа нуля, происходящий от источников питания. Стабилизатором напряжения служат сами микровариометры. Рассмотрим этот способ.

Изменение тока на выходе микровариометра прямо или косвенно связано с изменением питающих напряжений. Для определенности положим, что схема питается от четырех источников, которые обозначим: U_a — напряжение анодной батареи, U_n — напряжение накальной батареи, U_c — напряжение на осветителе, U_ϕ — напряжение питания фотоумножителя.

Если каждое напряжение изменится на некоторую величину dU , то полное изменение анодного тока лампы, или полный дифференциал тока I_a будет:

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a + \frac{\partial I_a}{\partial U_n} dU_n + \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_\phi} dU_\phi. \quad (53)$$

Введем обозначения:

$$\frac{\partial I_a}{\partial U_a} = R_i; \quad \frac{\partial I_a}{\partial U_n} = S_n; \quad \frac{\partial I_a}{\partial U_c} = S_c; \quad \frac{\partial I_a}{\partial U_\phi} = S_\phi,$$

где R_i — внутреннее сопротивление лампы; S_n , S_c и S_ϕ — обозначают, согласно терминологии, принятой для электронных ламп, крутизну по напряжениям питания U_n , U_c и U_ϕ . Учитывая также, что $dI_a = cdH$, перепишем (53) в виде

$$dH = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{R_i} dU_a + S_n dU_n + S_c dU_c + S_\phi dU_\phi \right). \quad (54)$$

Величины R_i , S_n , S_c и S_ϕ в пределах небольших изменений напряжений можно считать постоянными коэффициентами. Эти величины можно найти лишь экспериментально, подобно тому, как определяется, например, крутизна лампы S из вольт-амперной характеристики.

Подключим к каждому источнику питания по одной обмотке. На рис. 11 показан пример подключения обмотки автокомпенсации к источнику света. Эти обмотки выполняются обычно на том же каркасе, что и обмотки обратной связи и затухания. В рассматриваемом частотном диапазоне взаимодействием обмоток, расположенных на одном каркасе, можно пренебречь. Постоянные обмоток обозначим g_a , g_n , g_c и g_ϕ . Сопротивления,

включенные последовательно с катушками, обозначим соответственно R_a , R_n , R_c и R_ϕ . При тех же изменениях питающих напряжений получим следующее результирующее изменение магнитного поля в центре обмоток:

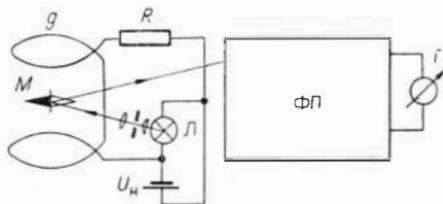


Рис. 11. Способ включения катушки для автоматической компенсации неустойчивости источника питания.

$$dH = \frac{g_a}{R_a} dU_a + \frac{g_n}{R_n} dU_n + \frac{g_c}{R_c} dU_c + \frac{g_\phi}{R_\phi} dU_\phi. \quad (55)$$

Приравнивая (54) и (55) и выписывая коэффициенты при одинаковых приращениях, получаем:

$$\frac{1}{cR_i} = \frac{g_a}{R_a}; \quad \frac{S_n}{c} = \frac{g_n}{R_n}; \quad \frac{S_c}{c} = \frac{g_c}{R_c}; \quad \frac{S_\phi}{c} = \frac{g_\phi}{R_\phi}. \quad (56)$$

Эти выражения определяют условия, при которых осуществляется автоматическая компенсация дрейфа нуля по источникам питания. Условия (56) легко выполняются путем подбора соответствующих сопротивлений в цепи автокомпенсации, числа витков в обмотках и необходимой полярности включения обмоток. В формулах (56) чувствительность микровариометра входит как константа. Это справедливо, однако, для небольших приращений питающих напряжений. В общем случае величина c также зависит от напряжения питания. Изменение чувствительности можно выразить в виде полного дифференциала:

$$dc = \frac{\partial c}{\partial U_a} dU_a + \frac{\partial c}{\partial U_n} dU_n + \frac{\partial c}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial c}{\partial U_\phi} dU_\phi. \quad (57)$$

В формулах (56) вместо c необходимо подставить $c - dc$. Следовательно, точность подбора параметров цепи автокомпенсации будет определяться степенью стабильности чувствительности в заданном интервале изменения напряжений питания.

Экспериментально было установлено, что чувствительность микровариометра, охваченного обратной отрицательной связью, коэффициент которой 1,5 з/а , при изменении всех питающих напряжений на 10% от номинальных значений изменяется примерно на 5%. Следовательно, в пределах тех же изменений напряжений погрешность системы автокомпенсации дрейфа нуля будет не более 5%. Понятно, что с сужением диапазона дрейфа питающих напряжений точность системы автокомпенсации будет возрастать.

На рис. 12 приведены практические графики, изображающие зависимость выходного сигнала от изменения некоторых источников питания. Все величины выражены в процентах, номинальные значения приняты за 100%. Кривые 1 относятся к микровариометру без автокомпенсирующих обмоток, кривые 2 — с включенными обмотками. В обоих случаях имеется обратная отрицательная связь. В реальных схемах напряжение питания может «дрейфовать» лишь в сторону уменьшения, что соответствует левым ветвям кривых. Как следует из приведенных графиков, таким способом можно уменьшить влияние источников питания в 10—20 раз. В отличие от известных схем уменьшения дрейфа нуля система автокомпенсации с помощью катушек Гельмгольца работает практически без энергетических затрат: ток, протекающий в катушках, пренебрежимо мал по сравнению с общим током, потребляемым микровариометром.

Для практического осуществления системы автокомпенсации не обязательно знать величины R_i , S_n , S_c и S_ϕ , входящие в формулы (56). Необходимо искусственно изменять величину данного напряжения, например U_a , на допустимую величину и подобрать такое сопротивление R_a , чтобы ток на выходе изме-

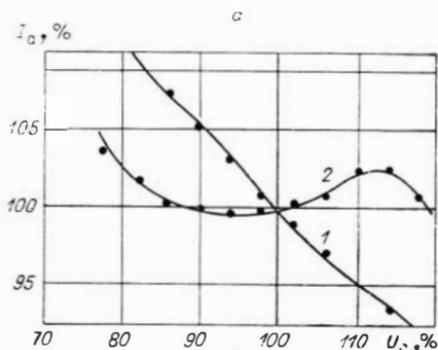
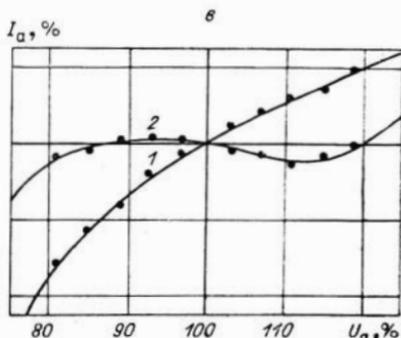
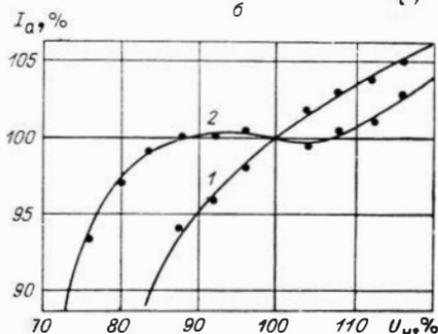


Рис. 12. Экспериментальные графики, снятые без системы автокомпенсации (1) и при наличии системы автокомпенсации (2):

а — зависимость дрейфа нуля микровариометра от источника света, б — от источника накала, в — от источника анодного питания.



нялся минимально. Число витков в компенсирующей обмотке выбирают таким, чтобы цепь автокомпенсации не потребляла значительного тока.

Компенсацию дрейфа нуля по описанному выше принципу можно вводить для любого источника питания, находящегося в схеме, если он оказывает дестабилизирующее влияние. Если один и тот же источник напряжения используется для питания нескольких цепей микровариометра, то практические приемы подбора параметров автокомпенсации не меняются, хотя аналитические условия автокомпенсации могут иметь сложный вид.

Важное свойство системы автокомпенсации состоит также в том, что она работает как стабилизатор напряжения. Любой сигнал на выходе микровариометра, вызванный случайным изменением напряжения, компенсируется противоположным сигналом, возникающим в обмотке компенсации. Таким образом можно существенно снизить шумы, возникающие в источниках питания, и значительно ослабить требования к выбору источников питания.

Известно, например, что надежность контактных соединений источников питания должна быть в микровариометре весьма высокой. Однако в результате окислительных процессов переходное сопротивление контактов изменяется: это особенно заметно для аккумуляторных батарей. При наличии системы автокомпенсации влияние переходных сопротивлений в контактах источников питания значительно ослабляется.

Система автокомпенсации дрейфа нуля надежно работает только при наличии в микровариометре обратной отрицательной связи.

Эффективность системы автокомпенсации зависит от постоянства параметров микровариометра, в частности от c , R_i , S_n , S_c и S_ϕ , стабильность которых поддерживается при помощи обратной отрицательной связи по магнитному полю.

ЧАСТОТНЫЕ И ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МИКРОВАРИОМЕТРОВ

Частотные свойства микровариометров

Микровариометр, как и всякая измерительная система, обладает определенной полосой пропускания для гармонических сигналов. Чтобы определить полосу пропускания, необходимо исследовать частотные свойства микровариометра.

В общем виде микровариометр представляет собой электро-механический фильтр по отношению к вариациям естественного магнитного поля. Для удобства анализа частотных и переходных свойств микровариометр можно разделить на три более или менее элементарных фильтра. Первым звеном является собственно микровариометр, вторым — электрический фильтр с дополнительным усилителем, третьим — регистрирующий гальванометр с согласующим фильтром. Цепь указанных фильтров схематически представлена на рис. 13.

Первое звено объединяет магнитоэлектрический датчик и фото-электрический преобразователь. Это звено является основной измерительной ячейкой микровариометра. Частотный диапазон измерений первого звена ограничен со стороны малых периодов (верхних частот) инерционностью подвижной системы датчика. Со стороны больших периодов ограничений нет: система может пропускать сигналы, изменяющиеся сколь угодно медленно. Однако в реальных схемах со стороны больших периодов из-

мерения ограничиваются нестабильностью нуль-пункта во времени. В случае медленно изменяющихся сигналов изменения нуль-пункта прибора трудно отличимы от действия полезного сигнала. Первые конструкции микровариометров обладали сравнительно узкой полосой пропускания: 10—1000 *сек*.

Расширение спектра измерений с помощью магнитометров с фотоэлектрическим преобразованием осуществлялось, с одной стороны, за счет оптимизации магнитостатических датчиков, с другой — путем введения специальных устройств, которыми обеспечивалась температурная и электрическая стабилизация магнитометров.

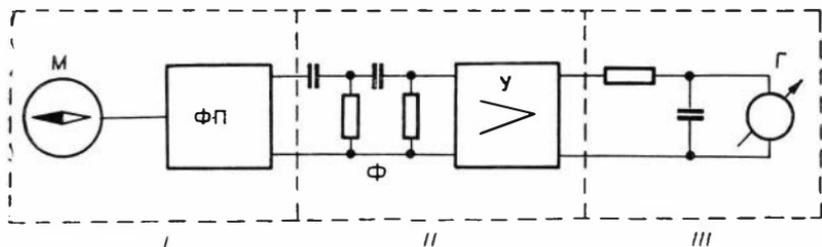


Рис. 13. Представление магнитного микровариометра в виде цепи из трех элементарных фильтров (звеньев).

В настоящее время диапазон измерений со стороны малых периодов ограничивается периодом приблизительно в 1 *сек* или в лучшем случае — долями секунды. При этом возможности уменьшения инерционности датчиков исчерпаны настолько, что, по всей вероятности, указанную частотную границу можно считать предельной для магнитостатического метода измерений*.

В области низких частот с помощью современных микровариометров возможна регистрация вариаций продолжительностью до 10^4 — 10^5 *сек*, хотя возможности дальнейшей стабилизации нуль-пункта в этих приборах еще полностью не использованы.

Для микровариометров, как известно, не ставится задача регистрации вариаций с продолжительностью более 10^4 — 10^5 *сек*, так как в области длиннопериодного спектра вариаций успешно могут работать более простые приборы — нормальные магнито-

* Технически не представляет особой трудности сконструировать магнитостатический датчик с полосой пропускания, например, до нескольких десятков или даже сотен герц, однако чувствительность при этом оказалась бы чрезвычайно низкой. Такой датчик, возможно, имел бы практическую ценность для измерения сильных полей. В данном случае речь идет об измерении естественных магнитных полей, интенсивность которых в диапазоне выше 1 *гц* весьма ничтожна: не более 10^{-6} э.

графы, тем более, что в этом диапазоне от магнитографов не требуется высокой чувствительности.

Следовательно, применение микровариометров принципиально возможно в интервале периодов $1-10^5$ сек. Указанной половиной пропускания и будет характеризоваться I звено.

Необходимость введения в микровариометр специального электрического фильтра обусловлена характером измеряемых вариаций. Прежде чем перейти к назначению второго звена, кратко охарактеризуем геомагнитные вариации в диапазоне $1-0$ *ц*.

В общем виде магнитограмма за большой интервал времени, например за сутки, представляет собой наложение различных типов колебаний и кажется, на первый взгляд, чисто случайным процессом. Статистическими методами обработки из этого случайного процесса наиболее отчетливо выделяется колебание с периодом в одни сутки. Интенсивность суточной волны для средних широт колеблется от 40 до 100 *гамм*. Изменение земного магнитного поля сопровождается, как правило, «бухтами» с интенсивностью от 10 до 50 *гамм* и видимым периодом изменения до 2—3 ч. В сильновозмущенные дни картина изменения магнитного поля еще более усложняется вариациями, которые не подчиняются определенным закономерностям. Наконец, на магнитограммах почти всегда присутствуют так называемые короткопериодические колебания (КПК) с периодами $1-100$ сек и интенсивностью от 0,1 до 5 *гамм*. Интересной особенностью КПК является почти гармонический характер их изменения. В зависимости от периода, частоты и морфологических особенностей КПК делятся на несколько групп: от РС1 до РС3.

Общей закономерностью магнитных вариаций является то, что их интенсивность, как правило, падает с уменьшением периода. Следовательно, не изменяя чувствительности измерительного устройства, трудно осуществить одновременную регистрацию всех типов вариаций. Наличие интенсивного фона одних вариаций не позволяет зарегистрировать с заданной точностью другие, менее интенсивные, но более необходимые для того или иного вида исследований типы возмущений.

В практике чаще других приходится выделять вариации типа КПК, поэтому фильтры, которые служат для их пропускания и подавления длиннопериодных вариаций, будем называть фильтрами КПК. Так как пассивные фильтры КПК создают весьма существенное затухание и для полезных сигналов, их приходится дополнять ламповыми усилителями.

Второе звено (или фильтр КПК) со стороны верхних частот ограничений не имеет. Низкочастотная граница фильтра

определяется его постоянной $\tau = RC$, которая устанавливается в зависимости от того, какие вариации необходимо выделять во время того или иного эксперимента.

Третьим звеном является магнитоэлектрический гальванометр, который совместно с согласующим электрическим фильтром представляет электромеханический фильтр нижних частот. Наличие разнообразных конструкций гальванометров позволяет выбрать параметры третьего звена так, чтобы оно не вносило дополнительных искажений в результаты измерений.

Анализ частотных и переходных свойств удобнее произвести вначале для каждого рассмотренного звена в отдельности. В заключение рассмотрим частотные и переходные характеристики микровариометра в целом. В случае изучения частотных свойств будем искать передаточную функцию (или частотную характеристику) того или иного звена при воздействии на него гармонического сигнала. При изучении переходных свойств будем пользоваться входным сигналом в виде одиночной «ступени».

Переходные и частотные характеристики в основном измерительном звене микровариометра

Для анализа переходных явлений I звена воспользуемся уравнением движения микровариометра. При этом будем рассматривать главные факторы, определяющие характер движения, и не учитывать возможные второстепенные явления: утечки в электрических цепях, паразитные емкости и т. п.

Из выражений (41), (42) и (47), представляющих частные случаи движения микровариометра, составим общее уравнение движения:

$$J\ddot{\varphi} + P\dot{\varphi} + G\varphi = M(H - H_0 - H_3), \quad (58)$$

где P и G — соответственно коэффициент успокоения и коэффициент кручения подвеса датчика.

Свободный член уравнения представляет сумму моментов сил, создаваемых полем вариации H , полем обратной связи H_0 и полем затухания H_3 . Целесообразно заменить переменную φ , которая непосредственно не измеряется, напряжением U на выходе микровариометра. Напряжение U на аноде усилительной лампы равно произведению анодного тока I на сопротивление анодной нагрузки R_a ($U = IR_a$). Из соотношения (11), учитывая, что $\varphi = \frac{dn}{I}$, имеем:

$$\varphi = \frac{I}{\Phi I} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{U}{R_a \Phi I}. \quad (59)$$

На основании (35) и (46)

$$\begin{aligned} H_0 &= \beta \frac{U}{R_a}; \\ H_3 &= g_2 C \dot{U}. \end{aligned} \quad (60)$$

Подставив (59) и (60) в уравнение движения (58), получим

$$\ddot{U} + \left(\frac{P}{J} + \frac{M\Phi'}{J} g_2 C \right) \dot{U} + \left(\frac{G}{J} + \frac{\beta M\Phi'}{R_a J} \right) U = \frac{M\Phi'}{J} H, \quad (61)$$

где

$$\Phi' = \Phi R_a l.$$

Введем обозначения:

$$\frac{P}{J} + \frac{M\Phi'}{J} g_2 C = 2h; \quad (62)$$

$$\frac{G}{J} + \frac{\beta M\Phi'}{J R_a} = \omega_0^2; \quad (63)$$

$$\frac{M\Phi'}{J} = k. \quad (64)$$

Тогда (61) приводится к форме уравнения, справедливого для любой колебательной системы с одной степенью свободы:

$$\ddot{U} + 2h\dot{U} + \omega_0^2 U = kH. \quad (65)$$

Из уравнения (61) следует выражение для статической чувствительности микровариометра по напряжению $\dot{U} = \ddot{U} = 0$ и, следовательно,

$$c_u = \frac{K}{\omega_0^2} = \frac{M\Phi'}{G + \frac{\beta M\Phi'}{R_a}}. \quad (66)$$

Выражения (62) и (63) для приведенного коэффициента затухания и частоты собственных колебаний определяют вид частотной характеристики микровариометра в области частот, близких к ω_0 . Подбор необходимого режима движения в первом звене производится за счет коэффициента h . При выбранной частоте собственных колебаний независимыми параметрами являются постоянная катушки затухания g_2 и емкость в цепи затухания C , которыми и задается необходимый режим.

Переходный процесс в колебательной системе наиболее наглядно проявляется при внезапном изменении сигнала, т. е. при его скачке с одного уровня на другой. Частотным случаем такого сигнала является «ступень» при включении или выключении постоянного поля. Включение и выключение постоянных сигнала

лов широко используется в вариационных приборах. Прямоугольные импульсы тока, например, подаются в градуировочную катушку магнитографа с целью определения его чувствительности.

Пусть свободный член в уравнении движения (65) есть постоянная величина: $kH(t) = kH_0$, тогда очевидным частным решением уравнения (65) ($\ddot{U} = \dot{U} = 0$) будет

$$U = \frac{kH_0}{\omega_0^2}.$$

Общее решение уравнения (65) при включении постоянного поля будет зависеть от режима демпфирования измерительной системы. В случае аperiодического движения, которому соответствует неравенство $\beta^2 = h^2 - \omega^2 > 0$, решение при нулевых начальных условиях будет иметь вид

$$U = U_0 \left[1 - e^{-ht} \left(\operatorname{ch} \beta t + \frac{h}{\beta} \operatorname{sh} \beta t \right) \right], \quad (67)$$

где

$$U_0 = \frac{kH_0}{\omega_0^2}.$$

В случае, если измерительная система поставлена в критический режим ($\beta = 0$, $h = \omega_0$), то движение системы будет описываться уравнением

$$U = U_0 [1 - (1 + ht) e^{-ht}]. \quad (68)$$

Численные значения величин h и ω_0 могут быть получены из формул (62) и (63). Однако при этом целый ряд параметров: P , G , J и других необходимо определить из опыта. Поэтому значительно проще опытным путем непосредственно определить ω_0 для данной колебательной системы и в зависимости от исследуемого режима ($h < \omega_0$ — колебательный режим, $h = \omega_0$ — критический и $h > \omega_0$ — аperiодический) варьировать величиной h . Исследуем, например, переходный процесс в микроварнометре, собственная частота которого $f_0 = 1$ гц ($\omega_0^2 \cong 40 \frac{1}{\text{сек}^2}$); режим работы — аperiодический.

Для некоторых сочетаний ω_0 и h значения переходной функции $k(\Gamma) = \frac{U}{U_0}$ приведены в табл. 1.

Рассмотрим движение измерительной системы микроварнометра при одновременном действии нескольких сигналов, напри-

h^2	$t, \text{сек}$						
	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4
$h^2 = \omega_0^2$	0,13	0,36	0,72	0,96	1,00	1,00	1,00
$h^2 = 1,5\omega_0^2$	0,12	0,32	0,64	0,90	0,99	1,00	1,00
$h^2 = 2\omega_0^2$	0,11	0,29	0,56	0,85	0,98	1,00	1,00
$h^2 = 3\omega_0^2$	0,105	0,25	0,49	0,76	0,95	1,00	1,00
$h^2 = 4\omega_0^2$	0,10	0,23	0,46	0,72	0,93	0,995	1,00
$h^2 = 5\omega_0^2$	0,095	0,215	0,41	0,67	0,90	0,99	1,00

мер, при включении или выключении градуировочного импульса во время регистрации вариаций.

Положим, что изменение магнитного поля происходит по следующему закону:

$$H = H_0 \sin(\omega t + \alpha) + mt, \quad (69)$$

α — фаза колебания в момент $t=0$, m — коэффициент пропорциональности.

Для небольшого интервала времени функцией (69) можно приблизительно описать характер изменения магнитного поля, представляющего суперпозицию двух процессов: вариаций типа КПК (синусоидальная часть поля) и суточного хода (линейная часть поля).

Пусть постоянное поле H , под действием которого измерительная система была первоначально отклонена, выключается в момент времени $t=0$.

По известным правилам найдем частное решение уравнения (65), свободный член которого равен $k[H_0 \sin(\omega t + \alpha) + mt]$,

$$U = C_3 \sin(\omega t + \alpha + \varphi) + C_4 t, \quad (70)$$

где

$$C_3 = \frac{kH_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4h^2\omega^2}}; \quad (71)$$

$$\varphi = \arctg \frac{2h\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}; \quad (72)$$

$$C_4 = \frac{km}{\omega_0^2}. \quad (73)$$

Общее решение уравнения (65) в случае аperiodического движения ($\beta^2 = h^2 - \omega_0^2 > 0$) будет иметь вид

$$U = C_1 e^{(\beta-h)t} + C_2 e^{-(\beta+h)t} + C_3 \sin(\omega t + \alpha + \varphi) + C_4 t. \quad (74)$$

Выпишем начальные условия уравнения движения (65):

$$\begin{aligned} U|_{t=0} &= C_1 + C_2 + C_3 \sin(\alpha + \varphi) = C_5; \\ U'|_{t=0} &= C_1(\beta - h) - C_2(\beta + h) + C_3\omega \cos(\alpha + \varphi) + C_4 = 0, \end{aligned} \quad (75)$$

где $C_5 = \frac{kH}{\omega_0^2}$ — отклонение измерительной системы в момент $t=0$.

Считая C_3 , C_4 и C_5 известными, из (75) можно определить коэффициенты C_1 и C_2 :

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{(\beta + h) C_5 + [(\beta - h) \sin(\alpha + \varphi) - 2\beta \sin(\alpha + \varphi) - \omega \cos(\alpha + \varphi)] C_3 - C_4}{2\beta}, \\ C_2 &= \frac{(\beta - h) C_5 + [\omega \cos(\alpha + \varphi) - (\beta - h) \sin(\alpha + \varphi)] C_3 + C_4}{2\beta}. \end{aligned}$$

График функции (74) на промежутке $[0, T]$ для некоторых фиксированных параметров приведен на рис. 14. Хотя переходный процесс заканчивается сравнительно быстро, величину «ступени» непосредственно из кривой определить нельзя: нижняя часть «ступени», вследствие того, что скачок происходит не мгновенно, оказывается «размазанной». Для более точного определения градуировочных отклонений на фоне вариации, изменяющихся достаточно плавно, пользуются параллельным переносом графиков вариаций, расположенных левее и правее градуировочной ступени, до наилучшего их совпадения. Величина смещения графиков по оси ординат и определяет величину «ступени».

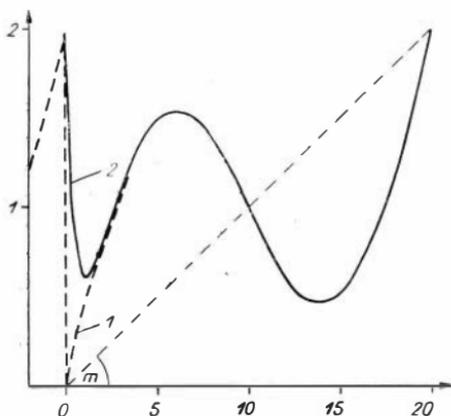


Рис. 14. Влияние переходных свойств I звена микроварпометра на регистрируемый сигнал:

1 — входной сигнал, характеризуемый следующими данными: $H=2$, $H_0=1$; $f=0,05$ гц, $\alpha=0$ при $t=0$, $m=1/10$; 2 — выходной сигнал.

Вернемся к решению (70), первое слагаемое которого описывает вынужденные колебания измерительной системы. Амплитуда и фаза установившихся вынужденных колебаний определяются формулами (71) и (72). По этим формулам можно определять частотные характеристики измерительной системы.

Отношение амплитуды установившихся колебаний к величине статического отклонения той же амплитуды, т. е. к $U_0 = \frac{hH_0}{\omega_0^2}$, дает частотную характеристику измерительной системы (микровариометра)

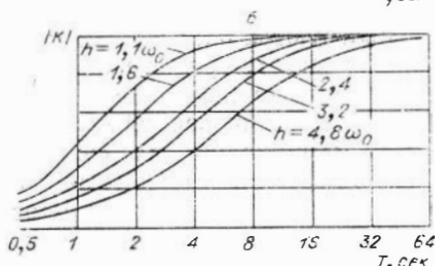
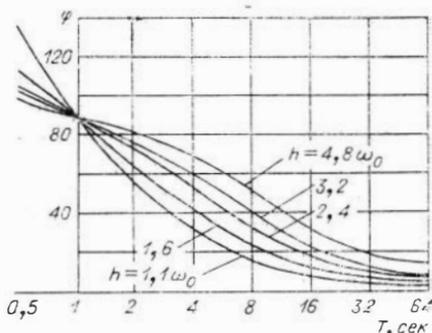
$$K(\omega) = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2}} = \frac{1}{T_0^2 \sqrt{\left(\frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T^2}\right)^2 + \frac{h^2}{\pi^2 T^2}}}. \quad (76)$$

Фазовая характеристика, согласно (72), будет определяться формулой

$$\varphi = \text{arctg} \frac{h}{\pi T \left(\frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T^2}\right)}, \quad (77)$$

где

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}; \quad T = \frac{2\pi}{\omega}.$$



Для некоторых случаев аperiodического режима зависимость амплитуды и фазы от периода дана в виде графиков (частотных и фазовых характеристик), представленных на рис. 15. Собственный период микровариометра везде принят равным одной секунде.

В области периодов, близких к собственному, вид частотных характеристик определяется коэффициентом затухания h . С увеличением h происходит уменьшение ам-

Рис. 15. Фазовые (а) и частотные (б) характеристики I звена микровариометра.

плитуды для одного и того же периода. С ростом h возрастают и фазовые искажения измеряемых вариаций. При $T=T_0$ фазовый сдвиг независимо от затухания стремится к $\frac{\pi}{2}$. При стремлении регистрировать более высокие частоты (малые периоды) необходимо, чтобы затухание измерительной системы было близким к критическому ($h \approx \omega_0$). В нашем случае при $T=1$ сек вариации с периодами $T=T_0$ срезаются почти наполовину, если установлен критический режим. В некоторых случаях можно использовать резонансные свойства микровариометра для более уверенной регистрации вариаций с периодами, меньшими собственного. В этом случае микровариометр ставится в колебательный режим ($h < \omega_0$). Частотные характеристики для различных сочетаний собственного периода и коэффициента затухания даны в виде таблиц (см. приложение, таблицы II—III.)

Переходные процессы и частотные характеристики фильтра КПК

Фильтр КПК служит для выделения короткопериодических колебаний естественного электромагнитного поля, охватывающих периоды 1—100 сек. Эти колебания в силу ряда их особенностей и, прежде всего гармонического характера их изменения, широко используются в практике геофизических исследований.

Граничная частота фильтра КПК выбирается по-разному в соответствии с конкретными требованиями. Нижняя граница частоты для фильтра КПК устанавливается обычно около 0,01 гц, и, следовательно, для такого интервала частот могут быть использованы только фильтры *RC*. Фильтры *RC*, как известно, не обладают хорошей добротностью и граничная частота для такого фильтра принимается весьма условно.

Граничной частотой $f_{гр}$ полосы пропускания фильтра КПК условимся называть такую частоту, при которой сигналы ослабляются по амплитуде не более 10%, по сравнению с сигналом, частота которого удовлетворяет условию $f \gg f_{гр}$.

Добротность или крутизна затухания фильтра КПК несколько возрастает с увеличением числа ячеек *RC*, однако при этом увеличивается громоздкость фильтра и увеличивается затухание сигналов в полосе пропускания, поэтому применение многосвязных фильтров для фильтрации КПК нецелесообразно. В микровариационной станции ГГ42 используются однозвенные и двухзвенные фильтры.

Выходное сопротивление фильтра КПК имеет значительную величину (около $10^6 - 10^7$ ом), поэтому нагрузка фильтра должна быть еще более высокоомной, чтобы не происходило шунтирования фильтра. В качестве согласующего устройства между фильтром и гальванометром обычно используют ламповый усилитель.

Изучение переходных и частотных характеристик проведем для двухзвенного Г-образного фильтра верхних частот. Для однозвенного фильтра соответствующие характеристики будут приведены в готовом виде.

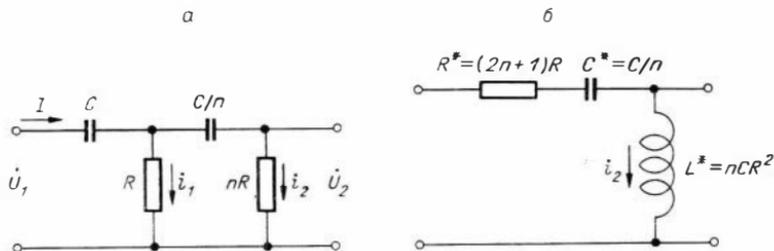


Рис. 16. Принципиальная и эквивалентная схемы двухзвенного фильтра RC верхних частот (II звена микровариометра).

Параметры двухзвенного фильтра должны быть подчинены условию: $R_1 C_1 = R_2 C_2$. Положим также $R_2 = nR_1$ и $C_2 = \frac{C_1}{n}$, где n — любое положительное число.

Коэффициент передачи фильтра определяется отношением сигнала на выходе к сигналу, действующему на входе U_0 .

$$\bar{k} = \frac{U}{U_0}. \quad (78)$$

Для выяснения вида функции \bar{k} при различной форме входного сигнала удобно двухконтурную схему фильтра (рис. 16, а) свести к эквивалентной одноконтурной схеме относительно тока i_2 (рис. 16, б).

Параметры эквивалентной схемы выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} R_{\text{эКВ}} &= (2n + 1) R, \\ C_{\text{эКВ}} &= \frac{C}{n}, \\ L_{\text{эКВ}} &= nCR^2. \end{aligned}$$

При действии на входе эквивалентного контура гармонического сигнала U_0 напряжение, выделяемое на нагрузке $L_{э,в}$,

$$U = U_0 \frac{j\omega n C R^2}{(2n+1)R + \frac{n}{j\omega C} + j\omega n C R}. \quad (79)$$

Из выражения (79) непосредственно следуют выражения для амплитудной и фазовой частотных характеристик:

$$k(\omega) = \frac{U}{U_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{x^2}\right)^2 + \frac{1}{x^2}\left(2 + \frac{1}{n}\right)^2}}; \quad (80)$$

$$\varphi = -\operatorname{arctg} \frac{2 + \frac{1}{n}}{x\left(1 - \frac{1}{x^2}\right)}, \quad (81)$$

где

$$x = \omega RC.$$

Соответствующие характеристики для однозвенного фильтра имеют вид:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{x^2}}}; \quad (82)$$

$$\varphi = -\operatorname{arctg} \frac{1}{x}.$$

На рис. 17 приведены графики зависимости $k(\omega)$ и φ от частоты для двухзвенного фильтра. Разным значениям параметра n (от 1 до 6) отвечает семейство кривых. Для сравнения здесь же нанесены частотные характеристики для однозвенного фильтра. Крутизна амплитудных кривых возрастает с увеличением n , но для значений $n > 2$ рост крутизны замедляется. Для практических целей можно ограничиваться величинами $n = 2 \div 3$. При слишком больших n может сильно возрасти величина nR , которая станет соизмеримой с омическим сопротивлением конденсатора, и поэтому низкочастотная составляющая будет плохо отфильтровываться.

У бумажных конденсаторов сопротивление постоянно-му току имеет порядок $R_c \cong 10^9$ ом. Для того, чтобы выполнить условие $R_c \gg R$, необходимо ограничить активное сопротивление фильтра RC величиной $R \ll 10^7$ Ом. Если за-

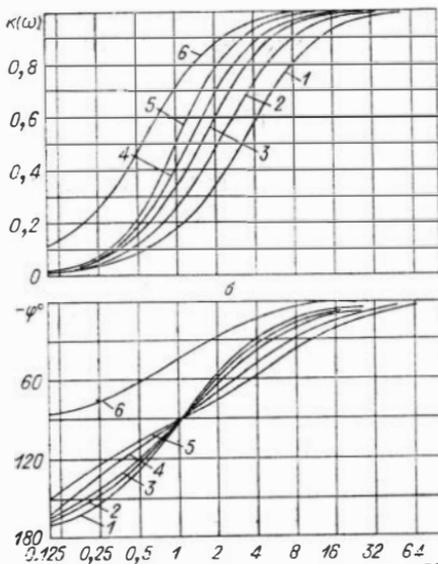


Рис. 17. Частотные (а) и фазовые (б) характеристики двухзвенного фильтра RC .

при включении на его вход постоянного напряжения U_0 . Функцию перехода обозначим $k(\Gamma) = \frac{U}{U_0}$. Как и в предыдущем случае воспользуемся эквивалентной схемой двухзвенного фильтра (см. рис. 16, б).

Ток в эквивалентном контуре будет определяться:

$$i = \frac{C}{n} \frac{dU_C}{dt}, \quad (83)$$

где U_C — напряжение на конденсаторе $\frac{C}{n} = C_{\text{экв}}$. Сумма напряжений на эквивалентной индуктивности $L_{\text{экв}}$, эквивалентном сопротивлении $R_{\text{экв}}$ и эквивалентной емкости равна напряжению U_0 , действующему на входе,

$$U_L + U_R + U_C = L_{\text{экв}} \frac{C}{n} \frac{d^2 U_C}{dt^2} + R_{\text{экв}} \frac{C}{n} \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_0. \quad (84)$$

Подставляя вместо эквивалентных параметров их значения из (79), перепишем уравнение (84) в виде

$$\ddot{U}_C + 2p\dot{U}_C + \lambda^2 U_C = U_0, \quad (85)$$

дана граничная частота, можно по частотным характеристикам рассчитать параметры фильтра.

Пусть $f_{\text{гр}} = 0,01$ гц (коэффициент ослабления = 0,9). Выберем $n=2$. Из кривой $n=2$ находим:

$$x = 2\pi f_{\text{гр}} RC = 4;$$

$$RC = 63,7 \text{ сек},$$

отсюда $R_2 = 10^7$ ом;

$$R_1 = \frac{R_2}{n} = 5 \cdot 10^6 \text{ ом},$$

$$C_2 = 6,5 \text{ мкф};$$

$$C_1 = nC_2 = 13 \text{ мкф}.$$

Фильтр с такими параметрами не является слишком громоздким.

Рассмотрим переходные процессы в фильтре КПК

где

$$\rho = \frac{2n+1}{2nRC}; \quad \lambda^2 = \frac{1}{R^2C^2}. \quad (86)$$

Решение уравнения (85) при нулевых начальных условиях ($U_C = 0$, $\dot{U}_C = 0$ при $t=0$) будет следующим:

$$U_C = U_0 \left\{ 1 - \frac{1}{2q} [(q+p)e^{(q-p)t} + (q-p)e^{-(q+p)t}] \right\}, \quad (87)$$

где

$$q = \sqrt{\rho^2 - \lambda^2} = \frac{\sqrt{4n+1}}{2nRC}.$$

Рассматриваемый контур является аperiодическим, так как для него всегда выполняется условие $q > 0$. Поэтому уравнение (85), в правой части которого стоит постоянная величина, имеет единственное решение (87).

Напряжение на выходе фильтра определяется напряжением на эквивалентной индуктивности:

$$U = U_L = nCR^2 \left(\frac{C}{n} \ddot{U}_C \right) = -U_0 \frac{R^2C^2}{2q} [(q-p)^2(q+p)e^{(q-p)t} + (q+p)^2(q-p)e^{-(q+p)t}]. \quad (88)$$

Из формулы (88) видно, что $k(\Gamma) = 1$ только при $t=0$; при $t > 0$ функция $k(\Gamma)$ быстро уменьшается и скорость спада тем больше, чем меньше величина RC .

Суммарные переходные частотные характеристики микровариометра

В микровариометре не все звенья участвуют в работе одновременно. В основном режиме — при регистрации суммарных вариаций магнитного поля — участвуют только I звено (собственно микровариометр) и III звено (гальванометр). Во вспомогательном режиме — регистрации вариаций типа КПК — участвуют все три звена.

Прежде чем исследовать суммарное влияние всех звеньев на переходную и частотную функцию, сделаем несколько замечаний относительно III звена — гальванометра.

Гальванометр является колебательной механической системой. Основные уравнения статики и динамики для подвижной системы рамки гальванометра и подвижной системы магнитостатического датчика формально ничем не отличаются. Вы-

пишем известные из теории гальванометров уравнения. В случае статического равновесия рамки гальванометра с удельным противодействующим моментом W имеет место следующее соотношение:

$$W\alpha = \psi I, \quad (89)$$

где α — угол отклонения рамки гальванометра от нулевого положения; ψ — потокосцепление рамки гальванометра; I — ток в рамке.

Движение рамки гальванометра описывается уравнением

$$J\ddot{\alpha} + P\dot{\alpha} + W\alpha = \psi i_g, \quad (90)$$

где J и P — соответственно момент инерции и коэффициент успокоения подвижной части гальванометра.

Уравнение (90) приводится к виду (65), если положить

$$\frac{P}{J} = 2h, \quad \frac{W}{J} = \omega_0^2, \quad \frac{\psi}{J} = k,$$

т. е. переходные и частные свойства, рассмотренные для I звена, справедливы и для III звена гальванометра.

Границей полосы пропускания инерционных измерительных систем со стороны верхних частот можно считать приближенно собственную частоту колебаний подвижного элемента датчика. В существующих конструкциях магнитостатических датчиков, применяемых для измерения естественных магнитных полей, собственная частота не превышает 10 гц. Разнообразные конструкции гальванометров, включая и осциллографические вибраторы, охватывают значительно больший диапазон измерений: собственная частота некоторых осциллографических гальванометров достигает 10^4 гц и выше. Поэтому имеются довольно широкие возможности выбора гальванометров с такими характеристиками, чтобы частотными и другими искажениями в гальванометре можно было пренебречь, по сравнению с магнитным датчиком. Практически искажения в III звене можно не учитывать, если собственная частота гальванометра не менее чем в 5 раз превышает собственную частоту магнитного датчика. Считаем, что при совместной работе всех звеньев микровариометра каждое последующее звено не оказывает влияния на предыдущее, т. е. отсутствует обратная связь между звеньями.

Рассмотрим суммарные переходные и частотные характеристики в цепи, состоящей из двух звеньев: собственно микровариометра и фильтра короткопериодических колебаний. Выделим два случая. В первом случае фильтр КПК представляет

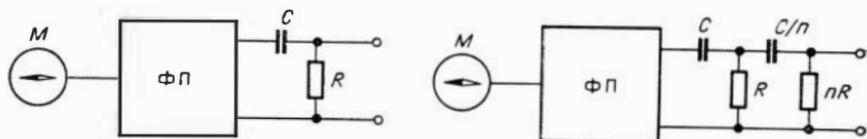


Рис. 18. Типы фильтров, применяемых в микроварпрометрах:

а — микровариометр с однозвенным RC -фильтром, б — микровариометр с двухзвенным RC -фильтром.

однозвенный Γ -образный фильтр верхних частот (рис. 18, а), во втором — двухзвенный Γ -образный фильтр (рис. 18, б).

а. Если на входе однозвенного Γ -образного RC -фильтра верхних частот действует напряжение U , то относительно напряжения на конденсаторе фильтра имеет место следующее дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\dot{U}_C + \lambda U_C = \lambda U; \quad \left(\lambda = \frac{1}{RC} \right). \quad (91)$$

Входным напряжением фильтра является напряжение, снимаемое с анода лампы I звена. В случае скачка поля на величину H_0 это напряжение описывается формулами (67) и (68). Подставляя эти выражения в (91) вместо U и решая оба уравнения при нулевых начальных условиях, получим для случая аperiodического движения измерительной системы I звена ($\beta = h^2 - \omega_0^2 > 0$)

$$U_C = U_0 \frac{\lambda}{2\beta} \left[\left(\frac{d}{\lambda + c} - \frac{c}{d - \lambda} - \frac{2\beta}{\lambda} \right) e^{-\lambda t} + \frac{2\beta}{\lambda} - \frac{d}{c + \lambda} e^{ct} + \frac{c}{d - \lambda} e^{-dt} \right]. \quad (92)$$

В выражение (92) введены следующие обозначения:

$$c = \beta - h; \quad d = \beta + h.$$

Для случая движения измерительной системы в критическом режиме ($\beta = 0, h = \omega_0$) будем иметь

$$U_C = U_0 \left[1 - \frac{h^2}{(\lambda - h)^2} e^{-\lambda t} - \lambda \left(\frac{h}{\lambda - h} - \frac{2h - \lambda}{(\lambda - h)^2} t \right) e^{-ht} \right]. \quad (93)$$

Напряжение на выходе фильтра, т. е. на сопротивлении R получим по формуле $U = RC \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{\lambda} \frac{dU_C}{dt}$,

подставив в нее выражения (92) и (93),

$$U = \frac{U_0}{2\beta} \left[\left(2\beta + \frac{c\lambda}{d-\lambda} - \frac{d\lambda}{c+\lambda} \right) e^{-\lambda t} - \frac{cd}{c+\lambda} e^{ct} - \frac{cd}{d-\lambda} e^{-dt} \right], \quad (94)$$

при $\beta > 0$;

$$U = \frac{U_0 h}{\lambda - h} \left[\frac{1}{\lambda - h} e^{-\lambda t} - \left(\frac{1}{\lambda - h} - t \right) e^{-ht} \right], \quad (95)$$

при $\beta = 0$.

Выражения (94) и (95), деленные на U_0 , представляют собой переходные функции микровариометра с однозвенным фильтром КПК.

Для рассматриваемой цепи (рис. 18, а) можно легко получить частотную характеристику.

Амплитудно-частотная характеристика многозвенной системы равна произведению характеристик отдельных звеньев. Из имеющихся выражений (76) и (82) для отдельных звеньев получим

$$k(\omega) = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4h^2\omega^2}} \cdot \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}. \quad (96)$$

Фазовая характеристика многозвенной системы равна алгебраической сумме фазовых сдвигов в отдельных звеньях, поэтому из (72) и (82) будем иметь

$$\gamma = \text{arctg} \frac{2h\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} - \text{arctg} \frac{1}{\omega RC}. \quad (97)$$

б. Для получения переходной функции микровариометра с двухзвенным RC -фильтром верхних частот воспользуемся дифференциальным уравнением (85) относительно напряжения на конденсаторе эквивалентной схемы двухзвенного фильтра КПК. Решение этого уравнения будем искать, как и для однозвенного фильтра, для двух значений вынуждающей силы, т. е. для напряжений, описываемых формулами (67) и (68) и соответствующих двум режимам работы микровариометра — аperiodическому ($\beta > 0$) и критическому ($\beta = 0$) при ступенчатом изменении сигнала на входе. Уравнение относительно U_c в случае $\beta > 0$ будет иметь своим свободным членом выражение (67), умноженное на λ^2 , т. е.

$$\ddot{U}_c + 2p\dot{U}_c + \lambda^2 U_c = \lambda^2 U_0 \left[1 - \frac{h+\beta}{2\beta} e^{(\beta-h)t} - \frac{\beta-h}{2\beta} e^{-(\beta+h)t} \right] \quad (98)$$

По-прежнему полагаем, что начальные условия нулевые, т. е. измерительная система в момент $t=0$ находится в покое.

Частное решение уравнения (98) получим в виде трех слагаемых в соответствии с выражением, стоящим в правой части:

$$U_C = U_0 \left[1 - \frac{h + \beta}{2\beta} \frac{\lambda^2}{(\beta - h)^2 + 2p(\beta - h) + \lambda^2} e^{(\beta - h)t} - \right. \\ \left. - \frac{\beta - h}{2\beta} \frac{\lambda^2}{(\beta + h)^2 - 2p(\beta + h) + \lambda^2} e^{-(\beta + h)t} \right]. \quad (99)$$

Рассматриваемый эквивалентный фильтр является аperiodическим ($q > 0$), поэтому общее решение уравнения (98) будет:

$$U_C = C_1 e^{(q-p)t} + C_2 e^{-(q+p)t} + U_0 \left[1 - \frac{h + \beta}{2\beta} \times \right. \\ \times \frac{\lambda^2}{(\beta - h)^2 + 2p(\beta - h) + \lambda^2} e^{(\beta - h)t} - \frac{\beta - h}{2\beta} \times \\ \times \left. \frac{\lambda^2}{(\beta + h)^2 - 2p(\beta + h) + \lambda^2} e^{-(\beta + h)t} \right]. \quad (100)$$

Введем следующие обозначения:

$$q - p = a; \quad q + p = b; \quad \beta - h = c; \quad \beta + h = d. \quad (101)$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из нулевых начальных условий: $\dot{U}_C = U_C = 0$ при $t = 0$

$$C_1 = \frac{U_0}{4\beta q} \left[\frac{(b + c) d \lambda^2}{c^2 + 2pc + \lambda^2} + \frac{(b - d) c \lambda^2}{d^2 - 2pd + \lambda^2} - 2\beta b \right]; \\ C_2 = \frac{U_0}{4\beta q} \left[\frac{(a - c) d \lambda^2}{c^2 + 2pc + \lambda^2} + \frac{(a + d) c \lambda^2}{d^2 - 2pd + \lambda^2} - 2\beta a \right]. \quad (102)$$

Напряжение на выходе фильтра, как уже отмечалось в предыдущем параграфе, определяется напряжением, которое создается на эквивалентной индуктивности ($L_{\text{эKB}} = nCR^2$), т. е.

$$U = U_L = L_{\text{эKB}} \frac{di}{dt} = C^2 R^2 \frac{d^2 U_C}{dt^2} = \frac{1}{\lambda^2} \frac{d^2 U_C}{dt^2}.$$

Подставляя в это выражение решение (100) для U_C , получаем

$$U = \frac{U_0}{4\beta q} \left\{ \left[\frac{(b + c) d}{c^2 + 2pc + \lambda^2} + \frac{(b - d) \cdot c}{d^2 - 2pd + \lambda^2} - \frac{2\beta b}{\lambda^2} \right] a^2 e^{at} + \right. \\ \left. + \left[\frac{(a - c) d}{c^2 + 2pc + \lambda^2} + \frac{(a + d) \cdot c}{d^2 - 2pd + \lambda^2} - \frac{2\beta a}{\lambda^2} \right] b^2 e^{-bt} - \right. \\ \left. - \frac{2qdc^2}{c^2 + 2pc + \lambda^2} e^{ct} - \frac{2qcd^2}{d^2 - 2pd + \lambda^2} e^{-dt} \right\}. \quad (103)$$

В случае ступенчатого изменения поля H_0 и критического затухания в I звене напряжение на его выходе изменяется, согласно (68), следующим образом:

$$U = U_0 [1 - (1 + ht) e^{-ht}].$$

Дифференциальное уравнение для напряжения U_c будет отличаться от (98) лишь свободным членом

$$\dot{U}_c + 2p\dot{U}_c + \lambda^2 U_c = \lambda^2 U_0 [1 - (1 + ht) e^{-ht}]. \quad (104)$$

Опуская ход решения данного уравнения, который мало отличается от предыдущего, приведем окончательный результат для напряжения на выходе измерительной системы (рис. 18, б):

$$U = \frac{U_0}{2q} \left\{ \left[(h - b) \Phi - \frac{b}{\lambda^2} + \frac{h}{Q} \right] a^2 e^{at} - \right. \\ \left. - \left[(h + a) \Phi + \frac{a}{\lambda^2} + \frac{h}{Q} \right] b^2 e^{-bt} + 2qh^2 \left(\Phi + \frac{2}{Q} - \frac{ht}{Q} \right) e^{-ht} \right\}, \quad (105)$$

где

$$a = q - p; \quad b = q + p;$$

$$\Phi = \frac{4ph - 3h^2 - \lambda^2}{Q^2};$$

$$Q = h^2 - 2ph + \lambda^2.$$

Для измерительной системы микровариометр — двухзвенный фильтр КПК (рис. 18, б) приведем также частотную и фазовую характеристики, которые, согласно (72), (76), (80) и (81), равны:

$$\lambda(\omega) = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2}} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2 R^2 C^2}\right)^2 + \frac{\lambda^2}{\omega^2 R^2 C^2} \left(2 + \frac{1}{n}\right)^2}}, \quad (106)$$

$$\gamma = \arctg \frac{2h\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} - \arctg \frac{2 + \frac{1}{n}}{\frac{\omega}{\lambda} \left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)}. \quad (107)$$

Проведем анализ некоторых свойств переходных функций измерительной системы микровариометр — фильтр КПК и рассмотрим возможности их практического применения.

На рис. 19 приведены графики переходных функций (94), (95), (103) и (105). Кривые 1, 3, 5 соответствуют схеме микровариометр — двухзвенный фильтр, 2, 4, 6 — схеме микровариометр — однозвенный фильтр. Характерное отличие этих

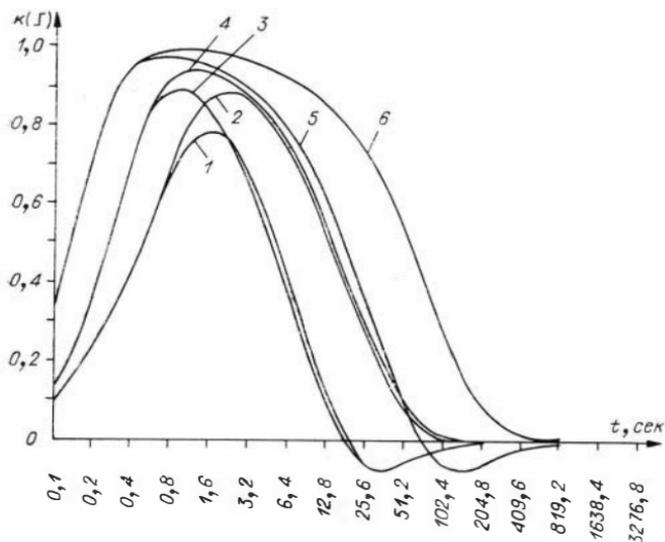


Рис. 19. Переходные характеристики микроварпометра с фильтром RC .

групп графиков состоит в том, что первые переходят в область отрицательных значений и затем медленно приближаются к нулю, вторые — стремятся к нулю, оставаясь все время положительными.

Переходные функции ни при каких значениях параметров не достигают значения $k(\Gamma) = 1$, т. е. всегда меньше величины статического отклонения, которое имело бы место при отсутствии фильтров. Это обстоятельство вынуждает вводить соответствующие поправки в величины фактически наблюдаемых градуировочных импульсов, если градуировка измерительной системы осуществляется прямоугольной «ступенью».

Значение максимума переходных функций уменьшается при возрастании коэффициента затухания. Кривые 1 и 3 для системы с двухзвенным фильтром (так же, как и кривые 2, 4 для однозвенного фильтра) отличаются лишь значением h . Для построения кривых 1, 2 использованы следующие параметры: $f_0 = 1$ гц, $h = 4\pi f_0$, $RC = 20$ сек; для кривых 3, 4 — те же параметры, кроме $h = 2\pi f_0$. При критическом затухании ($h = 2\pi f_0$) максимумы функций равны соответственно 0,89 и 0,94, при аперидическом ($h = 4\pi f_0$) — 0,78 и 0,88.

Максимум переходной функции приближается к $k(\Gamma) = 1$ при возрастании f_0 и увеличении постоянной фильтра; кривые

5, 6 построены при параметрах $f_0 = 2$ гц, $h = 2\pi f_0$ и $RC = 80$ сек. Эти кривые имеют более широкий максимум и не доходят до $k(\Gamma^-) = 1$ всего на 1—2%. Следовательно, при градуировании прибора прямоугольными импульсами поправки можно не вводить лишь в некоторых предельных случаях, например, если постоянная времени фильтров велика, а коэффициент затухания мал. Таблицы максимальных значений переходных функций при различных сочетаниях параметров f_0 , h и λ даны в приложении.

Из сопоставления пар кривых 1—2 (равно как и 3—4, 5—6) видно, что, несмотря на одинаковые параметры, использованные для вычисления этих пар, левые ветви кривых расходятся (смещены почти параллельно вдоль оси t). Это следствие того, что при увеличении числа звеньев фильтра в n раз происходит уменьшение эффективного значения постоянной времени во столько же раз.

Переходные, частотные и фазовые характеристики отдельно для I и II звена микровариометра при различных сочетаниях f_0 , h и λ приведены в виде таблиц (см. приложение).

**ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ
ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ
МИКРОВАРИАЦИОННОЙ
УСТАНОВКИ**

**Расчет взаимного влияния
подвижных магнитов датчиков**

К конструкциям полевых магнитовариационных приборов предъявляются жесткие требования в отношении их габаритов и веса. Улучшить эти характеристики можно лишь путем компактного размещения измерительных каналов. Однако сближение магнитных каналов приводит к другому нежелательному явлению — взаимному влиянию измерительных каналов, а следовательно, — к дополнительным погрешностям измерений.

Взаимное влияние между измерительными каналами микровариационной станции обусловлено, с одной стороны — взаимодействием подвижных магнитов датчиков и, с другой стороны — влиянием катушек Гельмгольца на подвижные магниты датчиков.

Статические магнитные поля датчиков мы не учитываем: эти поля малы по сравнению с полем Земли и практически легко могут быть скомпенсированы. Большую опасность представляет «динамическое» влияние, то есть та часть поля, которая наводится вращающимися магнитами датчиков и нестационарными токами в катушках, окружающих датчики.

Степень взаимного влияния зависит от расстановки датчиков в пространстве, угловой чувствительности датчиков и других

факторов, которые в совокупности и определяют конструкцию прибора. Оценка влияния между датчиками и преследует цель — выбрать по возможности оптимальную конструкцию.

В общем виде задача о взаимном влиянии системы из трех магнитов неоднократно рассматривалась, например в [51, 80]. Получим выражения для компонент напряженности поля постоянного магнита в произвольной точке пространства. Если ось магнита, который мы принимаем за диполь, совмещена с одной из координатных осей, например z , то, согласно [32], потенциал магнита V в произвольной точке определяется:

$$V = \frac{Mz}{r^3}, \quad (108)$$

M — магнитный момент магнита;

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Составляющие напряженности поля по осям находятся путем дифференцирования (108) по соответствующим координатам:

$$\begin{aligned} H_z &= -\frac{M}{r^3} + \frac{3Mz^2}{r^5}; \\ H_y &= \frac{3Myz}{r^5}; \\ H_x &= \frac{3Mxz}{r^5}. \end{aligned} \quad (109)$$

Учитывая осевую симметрию постоянного магнита, можно рассматривать его поле в одной плоскости, например xz .

$$\begin{aligned} H_z &= \frac{M}{r^3} \left(3 \frac{z^2}{r^2} - 1 \right); \\ H_x &= 3 \frac{M}{r^5} xz. \end{aligned} \quad (110)$$

Компоненты в других плоскостях могут быть найдены с помощью формул (110).

Представляют интерес следующие частные случаи:

$$\begin{aligned} H_z &= -\frac{M}{r^3} && \text{при } z=0; \\ H_z &= \frac{2M}{r^3} && \text{при } x=0; \\ H_x &= 0 && \text{при } z=0; \\ H_x &= 0 && \text{при } x=0. \end{aligned} \quad (111)$$

При динамическом взаимодействии датчиков координаты датчиков не изменяются, а изменяются лишь составляющие магнитного момента.

Соответствующие приращения M будут:

$$\begin{aligned}\Delta M_z &= M(1 - \cos \Delta\varphi), \\ \Delta M_x &= M\Delta\varphi,\end{aligned}\tag{112}$$

где $\Delta\varphi$ — угол отклонения магнита, который мы считаем малым. Выпишем соответствующие приращения компонент поля согласно (110).

$$\begin{aligned}\Delta H_z &= \frac{M}{r^3} \left(3 \frac{z^2}{r^2} - 1 \right) \Delta\varphi^2 + 3 \frac{M}{r^3} xz\Delta\varphi; \\ \Delta H_x &= \frac{3}{2} M \frac{xz}{r^3} \Delta\varphi^2 + \frac{M}{r^3} \left(3 \frac{x^2}{r^2} - 1 \right) \Delta\varphi,\end{aligned}\tag{113}$$

где $1 - \cos \Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi^2}{2}$.

При малых $\Delta\varphi$ члены, содержащие $\Delta\varphi^2$, также малы, поэтому приближенно можно написать

$$\begin{aligned}\Delta H_z &\cong 3 \frac{M}{r^3} xz\Delta\varphi; \\ \Delta H_x &\cong \frac{M}{r^3} \left(3 \frac{x^2}{r^2} - 1 \right) \Delta\varphi\end{aligned}\tag{114}$$

или, полагая $\frac{z}{r} = \cos \varphi$, $\frac{x}{r} = \sin \varphi$,

$$\begin{aligned}\Delta H_z &\cong 3 \frac{M}{r^3} \cos \varphi \sin \varphi \Delta\varphi; \\ \Delta H_x &\cong \frac{M}{r^3} (3 \sin^2 \varphi - 1) \Delta\varphi.\end{aligned}\tag{115}$$

Относительно конструкции датчиков, применяемых в практике магнитовариационных измерений, сделаем следующие пояснения.

1. Направление вектора намагниченности магнита-индикатора датчика совпадает с его осью.

2. Магнит-индикатор имеет только одну степень свободы — вращение вокруг оси, проходящей через центр тяжести магнита перпендикулярно его оси.

3. Магниты датчиков имеют следующую ориентировку. А. Датчик D . Ось магнита направлена по магнитному меридиану. Ось вращения магнита вертикальна. D -датчик измеряет, следовательно, составляющую поля, перпендикулярную к направлению магнитного меридиана. Б. Датчик H . Ось маг-

нита перпендикулярна к магнитному меридиану. Ось вращения вертикальна. H -датчик измеряет компоненту поля, направленную вдоль магнитного меридиана. В. Датчик Z . Ось магнита перпендикулярна направлению магнитного меридиана. Ось вращения магнита горизонтальна. Датчик измеряет вертикальную составляющую магнитного поля.

4. Углы отклонений магнитов-индикаторов от положения их равновесия малы (не более 1°).

5. Магнитные моменты магнитов у всех датчиков одинаковы. Следовательно, для системы датчиков H , D и Z , конструктивные особенности которых описаны выше, вытекают следующие свойства. 1. При произвольном расположении датчиков в горизонтальной плоскости влияния будут оказывать только компоненты поля вида $\Delta H = 3 \frac{M}{r^3} \sin \varphi \cos \varphi \Delta \varphi$, где φ — угол между осью магнита и направлением на возмущающий магнит. 2. Наименьшее взаимное влияние будет в том случае, если центры магнитов датчиков расположены на одной линии так, чтобы углы φ были равны нулю или $-\frac{\pi}{2}$. Однако расположение датчиков на одной прямой не является удобным из конструктивных соображений, так как требуется довольно сложная оптика или отдельные осветители на каждый датчик.

Вариант схемы расположения датчиков, который применен в микровариационной станции ГГ42, приведен на рис. 20. В качестве произвольных параметров выбраны линейные размеры установки, поскольку взаимодействие между магнитами обратно пропорционально третьей степени расстояний между датчиками. Остальные параметры установки: углы φ , магнитные моменты магнитов M , цена деления датчиков и другие заданы либо техническими условиями, либо требованиями предельной простоты конструкции.

Выпишем компоненты поля, действующие на каждый датчик для схемы, показанной на рис. 20.

1. На датчик D :

$$\Delta H = 0_{\left(\begin{smallmatrix} \text{со стороны} \\ Z\text{-датчика} \end{smallmatrix}\right)} + 3 \frac{M}{r^3} \sin \varphi \cos \varphi \Delta \varphi_{\left(\begin{smallmatrix} \text{со стороны} \\ H\text{-датчика} \end{smallmatrix}\right)}$$

2. На датчик H :

$$\Delta H = 0_{\left(\begin{smallmatrix} \text{со стороны} \\ Z\text{-датчика} \end{smallmatrix}\right)} + 3 \frac{M}{r^3} \sin \varphi \cos \varphi \Delta \varphi_{\left(\begin{smallmatrix} \text{со стороны} \\ D\text{-датчика} \end{smallmatrix}\right)}$$

3. На датчик Z :

$$\Delta H = 0_{\left(\begin{smallmatrix} \text{со стороны} \\ D\text{-датчика} \end{smallmatrix}\right)} + 0_{\left(\begin{smallmatrix} \text{со стороны} \\ H\text{-датчика} \end{smallmatrix}\right)}$$

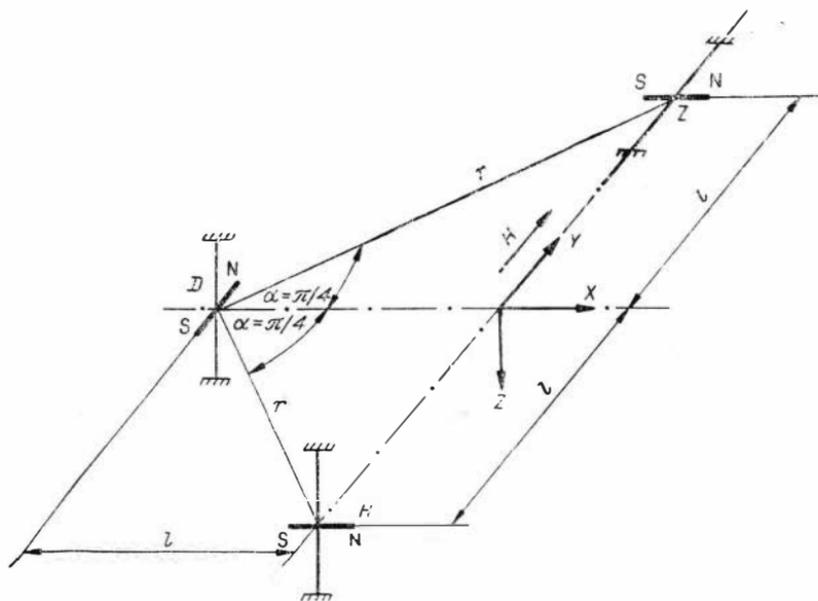


Рис. 20. Схема расположения магнитных систем в микровариационной станции типа ГГ42.

Следовательно, взаимодействие практически происходит только между H и D -датчиками, при этом

$$\Delta H \leq 3 \frac{M}{r^3} \sin \varphi \cos \varphi \Delta \varphi. \quad (116)$$

Отклонение «влияющего» магнита на угол $\Delta \varphi$ происходит в результате действия некоторой величины поля ΔH_0 , т. е.

$$c_0 = \frac{\Delta \varphi}{\Delta H_0},$$

где c_0 — чувствительность датчика в радианах на эрстед. Учитывая, что датчик охвачен обратной отрицательной связью, получим $\frac{c_0}{1 + c_0^2} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta H_0}$

или

$$\Delta \varphi = \frac{c_0 \Delta H}{1 + c_0^2}. \quad (117)$$

Подставим (117) в (116)

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_0} \leq 3 \frac{c_0 M}{r^3 (1 + c_0^2)} \sin \varphi \cos \varphi. \quad (118)$$

Следствием этого выражения является то, что степень взаимного влияния датчиков уменьшается с увеличением глубины обратной отрицательной связи. Отношение $\frac{\Delta H}{\Delta H_0}$ имеет смысл относительного влияния подвижного магнита датчика, где ΔH_0 — первичное поле, отклоняющее магнит на угол $\Delta\varphi$; ΔH — вторичное поле, которое наводится магнитом.

Из приведенной схемы (рис. 20) имеем

$$r = l\sqrt{2}; \quad \cos \varphi = \sin \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}};$$

тогда

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_0} \leq 0,53 \frac{M}{l^2} \frac{c_0}{1 + c_0^2}. \quad (119)$$

По техническим требованиям величина относительного влияния не должна превышать 0,5% ($\frac{\Delta H}{\Delta H_0} \leq 0,005$). Переходя от неравенства (119) к равенству, получаем

$$l = \sqrt[3]{0,53 \frac{Mc_0}{1 + c_0^2} \frac{\Delta H_0}{\Delta H}}. \quad (120)$$

Произведем подстановку числовых данных. Величина магнитного момента M обычно не превышает 10 CGSM; чувствительность датчика, как правило, в микровариометрах не превышает $1 \frac{\text{мм/м}}{\text{гамма}}$ или в радианной мере — 100 рад/э. Величина $1 + c_0\beta$ является параметром обратной связи и показывает, во сколько раз уменьшается чувствительность датчика (микровариометра) при введении обратной связи по сравнению с чувствительностью без обратной связи. Оптимальная величина этого параметра составляет в среднем $1 + c_0\beta = 10$, тогда

$$l = \sqrt[3]{0,53 \frac{10}{10} 100 \cdot 200} = 22 \text{ см.}$$

Такой линейный размер и принят в микровариационной станции ГГ42.

При отсутствии обратной связи $l = 47,5$ см.

Расчет влияния поля рассеяния катушек на магнитные датчики

Катушки, окружающие датчики, являются источниками магнитного поля рассеяния, которые представляют помеху для со-

седних датчиков. Вокруг каждого датчика имеется несколько обмоток и характер протекания токов в каждой из них зависит от назначения обмотки. Так, например, изменения тока в катушке обратной связи соответствуют характеру магнитного поля, действующему на датчик; весьма медленные изменения тока в катушках автокомпенсации соответствуют дрейфу питающих напряжений и т. д. Изменения тока в катушках, как правило, нестационарные, а следовательно, трудноконтролируемые. При оценке полей рассеяния, создаваемых этими токами, необходимо знать лишь экстремальные значения токов в катушках, т. е. максимально возможные пределы их изменений в данной конструкции микровариометра.

Магнитное поле кругового тока в произвольной точке вычисляется по известным формулам. Например, из [58] имеем следующие выражения для компонент H_x и H_y :

$$H_x = 2\pi I \frac{R^2}{\rho^3} \left[1 + \frac{3}{4} \frac{y^2}{\rho^4} (R^2 - 4x^2) + \frac{45}{64} \frac{y^4}{\rho^8} (R^4 - 12R^2x^2 + 8x^4) \right]; \quad (121)$$

$$H_y = 3\pi I \frac{R^2xy}{\rho^5} \left[1 - \frac{5}{8} \frac{y^2}{\rho^4} (3R^2 - 4x^2) - \frac{35}{64} \frac{y^2}{\rho^8} (5R^4 - 20R^2x^2 + 8x^4) \right]. \quad (122)$$

В этих формулах взяты лишь первые три члена ряда разложения координат по шаровым функциям, что вполне обеспечивает требуемую точность.

Обозначения, входящие в (121) и (122), даны на рис. 21. Обозначим геометрические факторы круговой рамки символами G_x и G_y , тогда выражения (121) и (122) запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} H_x &= G_x I; \\ H_y &= G_y I. \end{aligned} \quad (123)$$

Рассматриваемая схема расстановки катушек типа Гельмгольца (рис. 21) соответствует выбранной ранее схеме размещения датчиков (рис. 20): центры катушек совпадают с центрами магнитов, моменты катушек направлены вдоль измеряемых компонент поля. При таком расположении катушек влияние на соседние датчики оказывают только радиальные компоненты магнитного поля — H_y . Обозначим суммарные поля, наводимые в центре каждого датчика, от соседних катушек соответственно

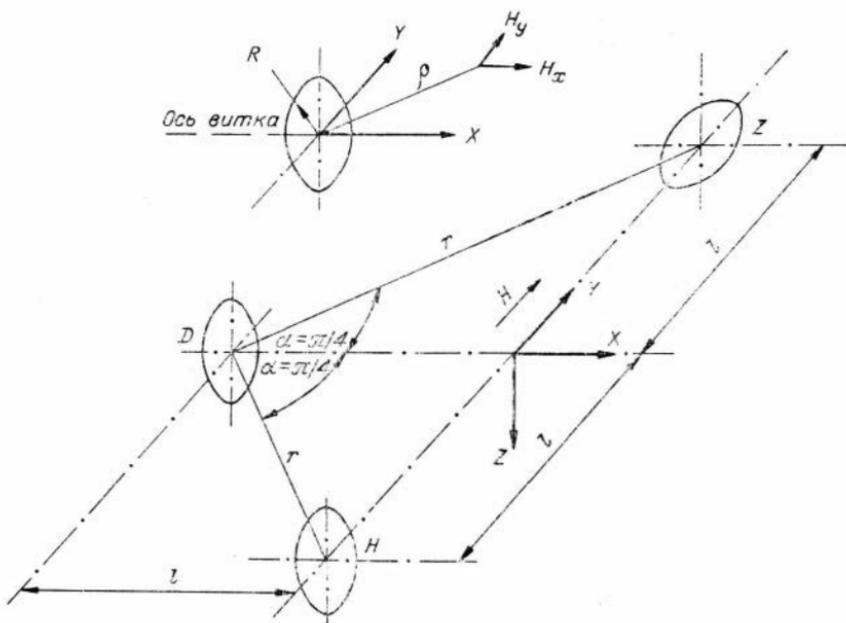


Рис. 21. Схема расположения катушек датчиков в микровариационной станции типа ГГ42.

$\Delta H^H, \Delta H^D$ и ΔH^Z , где верхний индекс указывает, в какой точке рассматривается суммарное поле. Положим, что каждая катушка датчика имеет n обмоток, N — число витков в каждой обмотке, I_n — ток, протекающий в n -ой обмотке и G_y — геометрический фактор, который в общем случае одинаков для всех обмоток (размеры всех катушек полагаем одинаковыми), тогда

$$\begin{aligned} \Delta H^H &= \left(\sum_n G_y^{(D \rightarrow H)} N I_n \right)^{(D \rightarrow H)} + \left(\sum_n G_y^{(Z \rightarrow H)} N I_n \right)^{(Z \rightarrow H)}; \\ \Delta H^D &= \left(\sum_n G_y^{(H \rightarrow D)} N I_n \right)^{(H \rightarrow D)} + \left(\sum_n G_y^{(Z \rightarrow D)} N I_n \right)^{(Z \rightarrow D)}; \\ \Delta H^Z &= \left(\sum_n G_y^{(H \rightarrow Z)} N I_n \right)^{(H \rightarrow Z)} + \left(\sum_n G_y^{(D \rightarrow Z)} N I_n \right)^{(D \rightarrow Z)}. \end{aligned} \quad (124)$$

Символ сверху у геометрических факторов обозначает, от какой катушки и в каком направлении подсчитывается множитель G_y . Тот же символ над скобкой указывает, от какой катушки и в каком направлении подсчитывается поле. Обращаясь к схеме, показанной на рис. 21, легко установить, что

$$G_y^{(H \rightarrow Z)} = G_y^{(Z \rightarrow H)} = 0; \quad G_y^{(D \rightarrow Z)} = G^{(Z \rightarrow D)} = 0$$

$G_y^{(H \rightarrow Z)} = G_y^{(D \rightarrow H)}$; т. е. взаимодействуют своими катушками только H и D -датчики.

Поэтому из системы уравнений (124) остается только одно:

$$\Delta H = \Delta H^H = \Delta H^D = \sum_n G_y N I_n \quad (125)$$

(символ у G_y сверху опущен).

Используя обозначения, данные на схеме ($x=y=l$ и $\rho = l \sqrt{2}$), перепишем (125) в соответствии с формулой (122)

$$\begin{aligned} \Delta H &= \frac{3\pi}{4\sqrt{2}} \frac{R^2}{l^3} \left[1 - \frac{5}{32} \frac{(3R^2 - 4l^2)}{l^2} - \right. \\ &- \left. \frac{35}{64 \cdot 16} \cdot \frac{(5R^4 - 20R^2l^2 + 8l^4)}{l^4} \right] \sum_n N I_n = \\ &= \frac{3\pi}{4\sqrt{2}} \frac{R^2}{l^3} P \sum_n N I_n, \end{aligned} \quad (126)$$

где P обозначает выражение, стоящее в квадратных скобках. Произведем оценку выражения (126).

А. Градуировочную обмотку можно исключить из рассмотрения, поскольку градуировочные импульсы обычно малы (порядка одной или нескольких гамм); кроме того, величина градуировочных отклонений всегда контролируется.

Б. Влиянием обмотки демпфирования можно также пренебречь, если принять во внимание, что цепь демпфирования является дифференцирующей цепью с постоянной времени менее $0,01 \text{ сек.}$ Следовательно, вариации, минимальный период которых составляет около 1 сек. , не будут пропущены этой цепью. В худшем случае обмотка демпфирования будет наводить кратковременные всплески, если на соседнем канале поле изменяется скачком.

В. Оценим величину компоненты поля, которую наводит катушка обратной связи.

Ток, текущий через цепь обратной связи, составляет в общем случае часть анодного тока лампы микроварпометра, т. е. $I_n = I_a \frac{R_1}{R_1 + R_0}$. Анодному току I_a соответствует некоторая величина поля H , они связаны между собой следующим образом:

$$I_a = Hc'$$

или

$$I_n = c' \frac{R_1}{R_1 + R_0} H = \frac{c}{1 + c\beta} \frac{R_1}{R_1 + R_0} H, \quad (127)$$

где c' и c — чувствительности микровариометра с обратной и без обратной связи.

Подставляя в одно из слагаемых (126) выражение (127), получаем

$$\Delta H = \frac{3\pi}{4\sqrt{2}} \frac{R^2}{l^3} PN \frac{c}{1 + c\beta} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_0} H$$

или

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{3\pi}{4\sqrt{2}} \frac{R^2}{l^3} PN \frac{c}{1 + c\beta} \frac{R_1}{R_1 + R_0}.$$

Замечая, что $\frac{2\pi}{R} N = g$ — постоянная катушки обратной связи относительно ее центра и $g \frac{R_1}{R_1 + R_0} = \beta$ — коэффициент обратной связи (см. формулы 31 и 35), получим

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{3}{8\sqrt{2}} \frac{R^3}{l^3} P \frac{c\beta}{1 + c\beta}. \quad (128)$$

Поскольку $c\beta \gg 1$, то $\frac{c\beta}{1 + c\beta} \cong 1$.

Величина $\frac{\Delta H}{H}$, как и в предыдущем случае, является мерой взаимного влияния между датчиками.

Подставляя численные значения $l = 22$ см и $R = 5$ см в (128), получаем $\frac{\Delta H}{H} = 0,0045$, т. е. величина относительного влияния катушки обратной связи составляет менее 0,5%. Мы взяли здесь предельный случай, когда глубина обратной связи велика ($c\beta \gg 1$). При уменьшении глубины обратной связи влияние катушки будет уменьшаться.

Г. Общее изменение тока в обмотках автокомпенсации равно сумме токов в отдельных обмотках $\sum_n I_n = \sum_n \frac{\Delta U_n}{R_n}$, где ΔU_n — максимальное изменение напряжения питания, например за сутки, R_n — полное сопротивление цепи автокомпенсации. По техническим требованиям допустимое уменьшение напряжения питания за сутки работы микровариометра не должно превышать 10% от номинального напряжения. В станции ГГ42 конструктивно заданы следующие источники питания: $U_{св} = 2,5$ в, $U_{и} = 2,5$ в; $U_a = 70$ в.

Из опыта получены следующие значения сопротивлений $R_{св} = 10^4 \text{ ом}$, $R_n = 5 \cdot 10^5 \text{ ом}$, $R_a = 10^6 \text{ ом}$ (подбор производился при оптимальном значении обратной отрицательной связи: $1 + c\beta = 10$). Следовательно,

$$\sum I_n = \frac{\Delta U_{св}}{R_{св}} + \frac{\Delta U_n}{R_n} + \frac{\Delta U_a}{R_a} \cong 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ а.}$$

Полагая число витков в автокомпенсационных обмотках равным 100 и подставляя полученную оценку для $\sum I_n$ в (126), будем иметь: $\Delta H \cong 0,2\%$. Если принять средний уровень суточной вариации около 50% , то относительная величина влияния катушек автокомпенсации составит 1% . Суммарное относительное взаимное влияние между датчиками в рассмотренной конструкции при самых неблагоприятных условиях не превышает, следовательно, 2% .

Оптическая система трехкомпонентных магнитометров с фотоэлектрическим преобразованием

Оптическая система в микровариационных приборах является весьма ответственным узлом. Такие характеристики микровариометров, как линейность измерений, экономичность прибора, стабильность нуля-пункта определяются в значительной мере качеством оптического преобразователя.

Оптика, являясь одним из элементов фотоэлектрического преобразователя, должна выполнять следующие функции: а) направлять световые потоки от осветительной лампы на зеркала датчиков и от них — к фотопреобразователям; б) рационально использовать лучистую энергию осветительных ламп; в) формировать световой поток осветителя в форме, которая обеспечивала бы максимальную линейность измерительной системы, нормальный режим работы фотоприемников и удобства для визуального наблюдения световых индексов.

Рассмотрим одну из возможных конструкций оптики для однокомпонентного микровариометра, схема которой представлена на рис. 22. Элементами этой схемы являются: проекционный коллиматор, включающий в себя осветительную лампу Л, конденсор К, щелевую диафрагму Щ и объектив О, зеркало датчика З, диафрагму фотоприемника Д.

В данной оптической схеме проектируется в плоскости диафрагмы фотоприемника светящееся отверстие щелевой диафрагмы в виде прямоугольного светового индекса. Предметом в

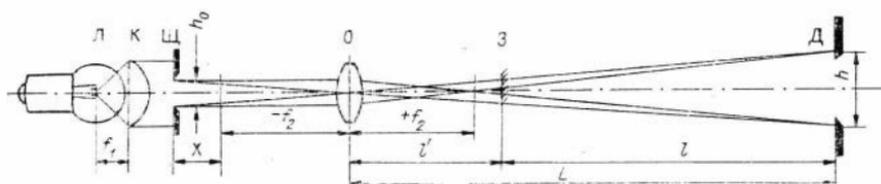


Рис. 22. Схема оптики для однокомпонентного микровариометра.

данном случае является светящееся отверстие щелевой диафрагмы, высота и площадь которого h_0 и s_0 , изображением — световой индекс с высотой h и площадью s . Способ проекции светящегося отверстия хорошо зарекомендовал себя на практике и используется в оптической системе микровариационной станции ГГ42. Линейное увеличение в коллиматоре, как правило, невелико, поэтому для расчета оптической системы микровариометра применимы принципы геометрической оптики.

Задача конструирования оптических систем микровариационных приборов с оптимальными характеристиками связана с решением ряда вопросов. Перечислим некоторые из них.

а. Известно, что в микровариометре основная доля потребляемой электрической энергии падает на осветитель. В то же время полезно используется лишь незначительная часть этой энергии. Приведем пример. Источник света излучает энергию практически равномерно во все стороны, т. е. телесный угол излучения близок к 4π . Телесный угол, опирающийся на площадь зеркала датчика, составляет менее $0,001\pi$. Следовательно, без специальных устройств коэффициент полезного использования светового потока составляет менее $0,01\%$. Повысить этот коэффициент можно только оптическими средствами (применением специальных конденсоров, излучателей и т. д.).

б. Разработка датчиков с малой инерционностью магнитной системы приводит к весьма ограниченному размеру зеркала. Для таких зеркал необходимо применять узкие световые пучки. В оптической системе датчика должна быть предусмотрена возможность минимального сужения светового потока в точке, где находится зеркало датчика.

в. Увеличенное изображение светящейся диафрагмы должно проектироваться точно в плоскости диафрагмы фотоприемника. Это необходимо для удобства визуального наблюдения и для оценки качества светового индекса.

Рассмотрим, в какой мере можно удовлетворить поставленным выше требованиям с помощью оптической схемы, показанной на рис. 22.

Первое требование можно выполнить, если использовать конденсор достаточно большой светосилы и если задний фокус конденсора совместить с нитью накала осветительной лампы. Коэффициент усиления светового потока определяется отношением телесных углов, под которыми видны входной зрачок коллиматора (он определяется внутренним диаметром оправы конденсора) и зеркало датчика

$$k = \frac{\pi r^2 / f_1^2}{S / L^*}, \quad (129)$$

где r — радиус входного зрачка коллиматора; S — площадь светового индекса; L^* — расстояние от источника света до диафрагмы фотоприемника.

Отношение $\frac{\pi r^2}{f_1^2}$ называется светосилой конденсора. Уве-

личить светосилу конденсора можно, увеличив его диаметр или уменьшив фокусное расстояние, насколько это возможно в данной конструкции. Так как фокус конденсора совмещен с нитью накала, то свет в коллиматоре будет приблизительно идти параллельным пучком до объектива. Для того, чтобы выполнить второе требование, необходимо передний фокус объектива $+f_2$ совместить с зеркалом датчика: вблизи фокуса $+f_2$ будет наиболее узкий пучок света. Практически более удобно с положением зеркала датчика совмещать изображение нити накала: если нить имеет небольшие размеры, то ее изображение проектируется на расстоянии от объектива несколько большем, чем f_2 . Для выполнения третьего требования необходимо подобрать фокусное расстояние объектива, а также определить местоположение объектива и щелевой диафрагмы. Фокусное расстояние f_2 можно определить из формулы для линейного увеличения линзы

$$f_2 = \frac{L}{1 - \beta}, \quad (130)$$

здесь L — расстояние от объектива до изображения (светового индекса); β — линейное увеличение. Для рассматриваемого случая $\beta = \frac{h}{h_0}$.

Положение щелевой диафрагмы относительно заднего фокуса f_2 объектива определим из соотношения для собирающей линзы

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f},$$

где d_1 и d_2 — расстояния от центра линзы до предмета и его изображения. В нашем случае

$$\frac{1}{x+f_2} + \frac{1}{L} = \frac{1}{f_2}, \quad (131)$$

x — искомое расстояние.

Подставив f_2 из (130), найдем:

$$x = \frac{L}{(\beta-1)(\beta-2)}. \quad (132)$$

Расстояние L из чертежа равно сумме расстояний: l — от датчика до щели фотоприемника и l' — от датчика до объектива. Оба эти расстояния задаются конструктивными требованиями.

Оценим светотехнические характеристики оптической схемы (см. рис. 22).

Освещенность отверстия щелевой диафрагмы в случае параллельного пучка лучей, выходящих из конденсора, не зависит от расстояния между щелевой диафрагмой и конденсором и равна освещенности входного зрачка конденсора. В реальных оптических устройствах не соблюдается строгая параллельность лучей, поэтому во избежание дополнительных потерь света щелевую диафрагму располагают по возможности ближе к конденсору. В частном случае щелевая диафрагма может совпадать с конденсором.

Освещенность щелевой диафрагмы

$$E = \frac{F}{\pi r^2}, \quad (133)$$

где πr^2 — площадь конденсора.

Световой поток F , падающий на конденсор, определяется произведением телесного угла Ω , под которым виден входной зрачок коллиматора, и силой света I_c излучателя

$$F = I_c \Omega = I_c \frac{\pi r^2}{f_1^2}. \quad (134)$$

Подставляя (133) в (134), получим

$$E = \frac{I_c}{f_1^2}. \quad (135)$$

Пренебрегая потерями света в коллиматоре, можно считать, что освещенность предмета $E_{\text{пр}}$ (щелевой диафрагмы) и освещенность изображения $E_{\text{из}}$ связаны следующим образом:

$$\frac{E_{\text{нр}}}{E_{\text{из}}} = \beta^2 \quad \text{или} \quad E_{\text{из}} = \frac{I_c}{f_1^2 \beta^2}. \quad (136)$$

На практике удобнее пользоваться единицами светового потока, так как все фотоприемники градуируются в единицах: а/лм , ма/лм .

Световой поток, идущий к фотоприемнику, можно определить из (136), зная площадь светового пучка s или площадь отверстия щелевой диафрагмы s_0 :

$$F = \frac{I_c s_0}{f_1^2}. \quad (137)$$

Фактические световые характеристики оптической системы будут несколько отличаться от расчетных, так как неизбежны потери света за счет поглощения, отражения и ограничения световых пучков оправками линз.

Микровариационные приборы, в которых сгруппированы несколько измерительных каналов, могут иметь либо автономные оптические системы в каждом канале, либо общую оптику, выполненную в виде одного узла. Преимуществом раздельной оптики является простота ее настройки, недостатками — громоздкость конструкции и большой расход электрической энергии осветителями.

В микровариационной станции ГГ42 используется трехколлиматорная оптическая система в виде отдельного узла с одной осветительной лампой. Расщепление светового потока на части осуществляется с помощью трех коллиматоров, каждый из которых выполнен по схеме (см. рис. 22).

Полная схема оптического преобразователя представлена на рис. 23. Рассмотренная выше схема размещения трех датчи-

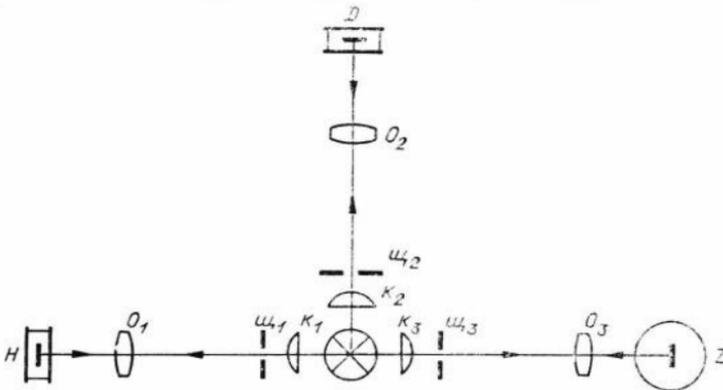


Рис. 23. Схема трехкомпонентного оптического преобразователя.

ков в значительной мере обусловлена конструкцией оптической системы, в которой сочетается компактность и возможность использования одной электрической лампы. Лучи от источника света расходятся в плане Т-образно и, падая на соответствующие зеркала датчиков, возвращаются обратно по тем же направлениям (в плане) к фотоприемникам. Пересечение оптических осей коллиматоров образует оптический центр, с которым совмещается источник света. Проекции оптических осей коллиматоров H и Z -датчиков на горизонтальную плоскость лежат на одной прямой и образуют главную оптическую ось, которая при работе прибора ориентируется в направлении «Север» — «Юг». Обозначения к оптической схеме даны на рисунке.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ И ГАЛЬВАНОМЕТРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МИКРОВАРИАЦИОННЫХ ПРИБОРАХ

Магнитостатические датчики

Магнитостатическим датчиком называют прибор, в котором индикатором магнитного поля является постоянный магнит, способный совершать отклонения, пропорциональные изменениям магнитного поля. Отсчет показаний датчика обычно производится с помощью зеркала, жестко связанного с магнитом. Конструкции магнитостатических датчиков различаются в основном размерами магнитной системы и способом ее крепления в датчике. Осью вращения магнитных систем датчиков по мере их совершенствования служили оси, вращающиеся в кернах, ножевые опоры, унифилярные и бифилярные подвесы и, наконец, различные типы растяжек.

Под термином «магнитостатический датчик» будем подразумевать все виды датчиков, индикатором которых является постоянный магнит, хотя это не совсем точно. Датчики, применяемые для измерения переменных полей, получили название магнитных вариометров, в то время как магнитостатический датчик означает прибор для измерения постоянных («статических») полей.

В магнитовариационных приборах и особенно в микровариометрах преимущественно применяются датчики, чувствительный элемент которых подвешен на тонких упругих растяжках

из кварца или металла. Эти датчики обладают малым противодействующим моментом и являются универсальными в отношении измерения различных компонент поля. Конструктивные варианты магнитных вариометров на кварцевых растяжках, выполненные в виде цельносварных кварцевых рамок, изложены в работах В. Ф. Шельтинга и В. Н. Боброва [10, 74]. Конструкциям датчиков с металлическими растяжками посвящены работы многих исследователей, например [31, 60].

Стабильность нулевого положения кварцевых магнитных систем выше, чем у систем на металлических растяжках, и первые незаменимы, например, в нормальных магнитографах, используемых на обсерваториях, где необходимо выдерживать постоянно базисных значений в течение продолжительного времени. Датчики в микровариометрах рассчитаны на менее продолжительную непрерывную работу, и здесь некоторое различие в свойствах кварцевых и металлических растяжек не имеет существенного значения. Из металлических сплавов высокими упругими свойствами отличаются, например, сплавы бронзы и особенно бериллиевая бронза. Этот материал не подвержен коррозии в воздушной среде.

Датчики с применением стандартных металлических растяжек выгодно отличаются от кварцевых простотой изготовления и значительными удобствами при эксплуатации их в полевых условиях, так как позволяют, например, произвести замену магнитной системы в случае ее обрыва, перестроить датчик на другое нормальное поле непосредственно в полевых условиях. Зная разрывное усилие для данного сорта растяжек, всегда можно создать оптимальное ее натяжение, которое бы обеспечивало минимальное провисание магнитной системы, а следовательно, и небольшую амплитуду поперечных колебаний системы.

Основными параметрами магнитостатического датчика, характеризующими его метрологические свойства, являются чувствительность c_0 и частота собственных колебаний f_0 .

Из уравнения движения датчика (41) имеем:

$$f_0^2 = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{G}{J}; \quad c_0 = \frac{M}{G}. \quad (138)$$

Удельный противодействующий момент G определяется следующей формулой для нити круглого сечения:

$$G = \frac{\pi}{2} N \frac{1}{l} \left(\frac{d}{2} \right)^4 \left[\frac{zcm}{mm/m} \right], \quad (139)$$

где N , l и d — модуль сдвига, длина и диаметр растяжки. Из

формулы (139) следует, что чувствительность и частота собственных колебаний датчика наиболее сильно зависят от сечения подвеса или растяжки.

Из (138) составим произведение $P = f_0^2 c_0$, которое назовем добротностью датчика

$$P = \frac{1}{4\pi^2} \frac{M}{J}. \quad (140)$$

Параметр P не зависит от упругих свойств подвеса или растяжек. Для цилиндрических магнитов, у которых отношение диаметра к длине мало (менее 0,05), можно написать

$$M = ISl; \quad J = \rho Sl^3, \quad (141)$$

где I — намагниченность постоянного магнита; S — сечение магнита; l — длина магнита; ρ — объемная плотность материала, из которого изготовлен магнит.

Подставив (141) в (140), получим

$$P = \frac{1}{4\pi^2} \frac{I}{\rho l^2}. \quad (142)$$

Добротность датчика зависит от плотности материала и намагниченности магнита-индикатора. Казалось бы, что увеличить P можно путем уменьшения длины магнита. Однако при этом нарушилось бы условие $\frac{d}{l} < 0,05$, и поэтому за счет возрастания размагничивающего фактора произойдет уменьшение намагниченности, и при некотором отношении $\frac{d}{l}$ величина P станет даже уменьшаться.

Следовательно, отношение $\frac{M}{J}$, которым характеризуется добротность датчика, имеет для данного магнита при некотором отношении $\frac{d}{l}$ максимум. Значение добротности для каждого магнитного материала можно найти как функцию от $\frac{d}{l}$. Из приведенных выше рассуждений следует, что добротность магнитных систем датчиков имеет некоторый предел, превзойти который нельзя никакой «рациональной» конструкцией датчика. Обозначим этот предел: $P_{\max} = f_0^2 c_0$. Опыт показывает, что для лучших конструкций магнитостатических датчиков $P_{\max} \cong 1$, если частоту собственных колебаний измерять в герцах, а чувствительность — в $\frac{\text{м.м./м}}{\text{га.м.м.}}$. Например, если чувствитель-

ность магнитного вариометра равна $1 \frac{\text{м.м./м}}{2\text{а.м.ма}}$, то его собственная частота будет около 1 гц. Из P_{max} можно получить любые сочетания f_0 и c_0 . Например, нетрудно изготовить датчик, у которого частота собственных колебаний была бы равна 10 гц; частотная характеристика такого датчика расширилась с 1 до 10 гц, однако достигнуто это слишком дорогой ценой: чувствительность датчика уменьшилась в 100 раз.

Это противоречие между основными параметрами датчика особенно проявляется в тех случаях, когда необходимо регистрировать наиболее короткопериодную часть КПК (выше 5 гц). В этом случае необходимо повышать одновременно и f_0 и c_0 , что невозможно сделать в нормальном магнитографе. Указанное противоречие в значительной степени удается преодолеть с помощью микровариометра, в котором P_{max} может достигать значения $1000 \frac{\text{м.м./м}}{2\text{а.м.ма} \cdot \text{сек}^2}$ и более.

Стабильность магнитоэлектрических датчиков

Погрешности измерений, которые вносятся датчиком, обусловлены нестабильностью его элементов: магнита-индикатора, компенсационных магнитов, подвесов и других вспомогательных деталей. Причинами нестабильности датчика могут быть: 1) броуновское движение в элементах датчика; 2) собственные колебания магнитной системы; 3) «старение» магнитов и другие необратимые процессы; 4) влияние температуры.

Первые две причины создают шумы в датчике, которые вызывают колебание магнитной системы около некоторого среднего уровня или базисного значения. С броуновским молекулярным движением приходится считаться в том случае, если цена деления датчика менее чем $3 \cdot 10^{-10}$ э/м.м/м [82]. Порог чувствительности микровариометра на два порядка ниже, поэтому это явление в датчике можно не учитывать.

Установка микровариометров, равно как и всех геомагнитных приборов, производится вдали от источников механических и других помех, которые могли бы вызвать собственные колебания в датчике. С другой стороны, существующие способы гашения собственных колебаний в микровариометрах достаточно эффективны. Опыт показывает, что механические колебания в современных конструкциях датчиков не оказывают существенного влияния на порог чувствительности микровариометров.

Другие две причины вызывают дрейф нулевого положения магнитной системы во времени. Особенность работы датчика

состоит в том, что на него действует кроме геомагнитных вариаций значительная по величине постоянная часть магнитного поля Земли — нормальное поле. Постоянная составляющая геомагнитного поля превышает переменную в зависимости от типа возмущений в 10^3 — 10^6 раз, что непосредственно указывает на порядок стабильности, которой должен обладать датчик. Относительную погрешность датчика можно принять за меру его стабильности, тогда

$$\nu = \frac{\delta H}{H_0 + H_1},$$

где δH — приведенная абсолютная погрешность; H_0 — величина нормального поля; H_1 — величина переменного поля.

Так как $H_1 \ll H_0$, то $\nu = \frac{\delta H}{H_0}$. Таким же образом в главе I дано определение для относительной погрешности фотоэлектрического преобразователя, с той разницей, что абсолютная погрешность, создаваемая нестабильностью электрических параметров, была отнесена к переменному полю (на фотоэлектрический преобразователь постоянное поле не действует). При этом относительная погрешность датчика, обусловленная шумовыми эффектами, по сравнению с относительной погрешностью фотоэлектрического преобразователя предполагалась незначительной; из оценок шумов датчика, приведенных выше, это действительно имеет место.

По-иному следует рассматривать погрешность, вызываемую медленным изменением параметров датчика во времени и его температурной нестабильностью. Соответственно одна компонента погрешности есть функция времени, другая — функция температуры. Компонента, зависящая от температуры, может быть выражена аналитически для любого датчика. Имеется ряд искусственных приемов, известных в магнитометрии под названием температурной компенсации датчиков, которыми компонента погрешности, обусловленная температурой, обращается в нуль. В следующем параграфе будут рассмотрены некоторые из них.

Компонента дрейфа нуля датчика, зависящая от времени, не может быть выражена аналитически. С течением времени эта компонента имеет тенденцию накапливаться. Следовательно, нельзя указать абсолютное значение этой погрешности, поскольку она не имеет предела. Приведем некоторые примеры. Предположим, что средняя амплитуда вариаций КПК составляет 2^γ , $H_0 = 0,2$ э. Погрешность измерения не должна быть больше 1%, т. е. $0,02^\gamma$. Поэтому относительная погрешность датчи-

ка должна быть 10^{-6} . В то же время, если рассматривать дрейф нуля датчика за сутки, то даже в самых лучших конструкциях он составляет не менее 1^γ . Если принять эту величину за абсолютное значение погрешности, то относительная погрешность датчика составит $5 \cdot 10^{-5}$, т. е., казалось бы, таким датчиком нельзя измерять вариации типа КПК с заданной выше точностью. На самом деле это не так: мы не указывали время, в течение которого измеряется колебание типа КПК. Максимальный период для КПК составляет ориентировочно 500 сек, и вполне очевидно, что дрейф нуля за столь небольшой промежуток времени пренебрежимо мал. Относительную нестабильность датчика (а следовательно, и всего микровариометра), вызванную дрейфом нуля, можно было бы определить следующим образом:

$$\nu = \frac{\delta H_T}{H_0},$$

где δH_T — дрейф нуля за время, равное периоду измеряемых колебаний. Так, оценка $\nu = 5 \cdot 10^{-5}$, полученная выше, будет характеризовать точность измерения суточной вариации в поле $H_0 = 0,2\text{э}$ при $\delta H_T = 1^\gamma$. Если амплитуда суточной вариации равна, например, 40^γ , то погрешность измерения такой вариации равна 2,5% при $\delta H_T = 2^\gamma - 5\%$ и т. д.

Следует заметить, что датчик в микровариометре работает не изолированно, а охватывается обратной отрицательной связью по магнитному полю. Фактическая нестабильность датчика при работе его в схеме микровариометра будет в $1 + c\beta$ раз меньше, где c — чувствительность микровариометра, β — коэффициент обратной связи.

Температурная компенсация датчиков

Создание различных конструкций магнитостатических датчиков способствовало в то же время разработке целого ряда методов их температурной стабилизации. Наибольшее применение получили магнитные способы температурной компенсации, из которых отметим следующие два. В первом приводится к нулю суммарный температурный коэффициент подвижной системы датчика путем подбора соответствующих материалов для подвижного магнита и подвеса. Во втором создается нулевое поле в месте расположения подвижного магнита с помощью дополнительных магнитов, обладающих суммарным нулевым температурным коэффициентом. Второй способ представляется более простым и надежным. Он позволяет периодически корректировать температурную стабилизацию по мере необратимых изме-

нейший свойств магнитов. Большой универсальностью обладает способ температурной компенсации, предложенный проф. Б. М. Яновским. Этот способ был назван «способом калмалоя», так как стабилизация величины магнитного момента магнита происходит с помощью пластинки калмалоя. Этот способ одинаково пригоден в любом варианте магнитной компенсации и особенно — в варианте создания нулевого поля в точке расположения магнита-индикатора. Большой вклад в разработку способов температурной компенсации магнитных варпометров внесли сотрудники ИЗМИР АН СССР. В частности, В. Н. Бобров осуществил ряд модификаций температурной компенсации кварцевых магнитных систем: способ антипараллельных магнитов, компенсация с помощью магнитов, обладающих нулевым температурным коэффициентом, и другие.

Возможность создания магнитов с нулевыми температурными коэффициентами позволяет еще больше усовершенствовать датчики магнитного поля. Применительно к используемым в микровариационной станции ГГ42 датчикам рассмотрим некоторые разновидности температурной компенсации, сходные в общем с существующими, но учитывающие линейное температурное расширение держателей для компенсирующих магнитов. Постоянство нуля-пункта датчика зависит от температурных свойств элементов датчика: от стабильности магнитных моментов магнитов как подвижного, так и неподвижных, материала подвесов и материала держателей неподвижных магнитов. Для практически используемого интервала температур эта зависимость линейна от температуры t° :

$M = M_0(1 \pm \mu t^\circ)$ — для магнитного момента постоянного магнита;

$G = G_0(1 \pm \beta t^\circ)$ — для удельного противодействующего момента подвеса;

$l = l_0(1 + \alpha t^\circ)$ — для линейного расширения материала держателей неподвижных магнитов, где μ , β и α — температурные коэффициенты магнитного момента, удельного противодействующего момента и длины держателя; M_0 , G_0 и l_0 — соответствующие значения параметров при t° , например, при 20°C .

Схема расположения компенсирующих и подвижных магнитов в датчике показана на рис. 24.

Относительно магнитной системы, в которой будет осуществляться магнитная температурная компенсация, сделаем следующие замечания:

1) подвижный и компенсирующие магниты расположены в общем герметичном домике. Тепловая инерция у магнитов будет, следовательно, одинаковой;

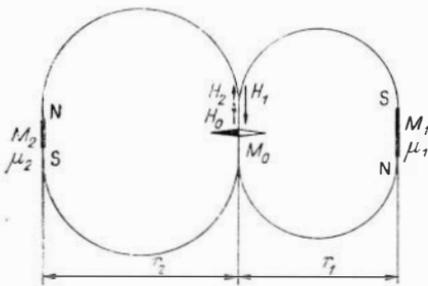


Рис. 24. Схема температурной компенсации датчика.

M_0 — подвижный магнит; H_0 — нормальное поле;
 M_1, M_2 — магнитные моменты компенсирующих магнитов;
 H_1, H_2 — поля, создаваемые компенсирующими магнитами.

2) подвижный магнит подвешен на упругих ленточных растяжках и может измерять любую компоненту поля. Растяжка проходит строго через центр тяжести подвижной массы;

3) растяжки в нормальном поле раскручены, следовательно, их температурные свойства не оказывают влияния на изменение нулевого отсчета.

Подчиним параметры магнитов следующему условию: при $t^0 = 0$

$$H_1 - H_2 = H_0. \quad (141)$$

В общем случае

$$\frac{M_1(1 - \mu_1 t^0)}{r_1^3(1 + \alpha t^0)} - \frac{M_2(1 - \mu_2 t^0)}{r_2^3(1 + \alpha t^0)} = H_0, \quad (142)$$

здесь μ_1 и μ_2 — температурные коэффициенты магнитов, которые полагаем отрицательными.

Условие (141) может быть выполнено только при антипараллельном расположении магнитов M_1 и M_2 .

При $\alpha \ll 1$ (142) примет следующий вид:

$$\frac{M_1(1 - \mu_1 t^0)}{r_1^3} - \frac{M_2(1 - \mu_2 t^0)}{r_2^3} = H_0(1 + 3\alpha t^0). \quad (143)$$

Принимая во внимание

$$\frac{M_1}{r_1^3} = H_1, \quad \frac{M_2}{r_2^3} = H_2 \text{ и } H_1 - H_2 = H_0$$

при $t^0 = 0$,
 получим:

$$\begin{aligned} H_1 &= H_0 \frac{3\alpha + \mu_2}{\mu_2 - \mu_1}; \\ H_2 &= H_0 \frac{3\alpha + \mu_1}{\mu_2 - \mu_1}. \end{aligned} \quad (144)$$

Выражения (144) представляют условия температурной компенсации, в которых H_1 и H_2 не зависят от температуры.

Из (144) следует, что $H_1 > H_0$, $H_2 > H_0$.

Магнитные поля H_1 и H_2 тем больше приближаются к нормальному полю H_0 , чем больше различие между μ_1 и μ_2 .

При положительных μ_1 и μ_2 условия температурной компенсации будут иметь вид:

$$\begin{aligned} H_1 &= H_0 \frac{3\alpha - \mu_2}{\mu_1 - \mu_2}; \\ H_2 &= H_0 \frac{3\alpha - \mu_1}{\mu_1 - \mu_2}. \end{aligned} \quad (145)$$

Если $\mu_1 > 0$, $\mu_2 < 0$, то

$$\begin{aligned} H_1 &= H_0 \frac{3\alpha + \mu_2}{\mu_1 + \mu_2}; \\ H_2 &= H_0 \frac{3\alpha - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2}. \end{aligned} \quad (146)$$

Направление полей H_1 и H_2 будет определяться их величиной: большая величина должна быть противоположна нормальному полю H_0 , меньшая — совпадает с направлением нормального поля. Выражения (144), (145) и (146) получены при условии антипараллельности магнитов. Если знаки у H_1 и H_2 получаются разными, это будет означать, что направления магнитных моментов M_1 и M_2 будут совпадать (параллельное расположение магнитов).

Наконец, при $\mu_1 = \mu_2 = 0$ выведенные условия теряют смысл. В этом случае магниты M_1 и M_2 располагаются произвольно при соблюдении требования, чтобы их суммарное поле было равным H_0 и обратным по направлению.

Для обеспечения независимости нулевого отсчета от линейного расширения держателей магнитов M_1 и M_2 следует эти держатели изготовить из материалов с малым значением α , например из плавленого кварца. Для осуществления температурной компенсации датчиков по перечисленным модификациям необходимо иметь магниты с различными температурными коэффициентами. Хорошо изучены свойства магнитного сплава викаллой [11], который в зависимости от режима термической обработки может давать

$$\mu > 0, \mu = 0 \text{ и } \mu < 0.$$

Для пояснения порядка выполнения операций по температурной компенсации датчика приведем пример. Произведем на-

стройку системы для измерения горизонтальной составляющей. Пусть $H_0=0,18$ э. Пусть в наличии имеются такие магниты: $M_1=10$ ед., $M_2=5$ ед., $\mu_1=10^{-4}$, $\mu_2=1,5 \cdot 10^{-4}$. Магниты крепятся на дюралюминиевом основании ($\alpha=2 \cdot 10^{-5}$), μ_1 и μ_2 считаем отрицательными. Из (144) имеем $H_1=0,756$ э, $H_2=0,576$ э,

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{M_1}{H_0}} = 23,6 \text{ мм}, \quad r_2 = \sqrt[3]{\frac{M_2}{H_2}} = 20,7 \text{ мм}.$$

В рассмотренном примере различие между μ_1 и μ_2 невелико, поэтому расстояния r_1 и r_2 получились небольшие, а создаваемые магнитами поля H_1 и H_2 значительно превосходят H_0 .

Характеристики регистрирующих гальванометров

Принципиально в схеме микровариометра может быть применен любой гальванометр, если он обладает достаточной чувствительностью и не вносит в схему дополнительных искажений. Гальванометр, кроме того, должен иметь устройство для записи регистрируемых процессов на фотобумагу, диаграммную ленту и т. п.

Требуемая чувствительность гальванометра легко может быть подсчитана, если известна пороговая цена деления микровариометра $\varepsilon_{\text{п}}$ и его фактическая цена деления по току ε_i . Так как цена деления гальванометра определяется обычно в амперах на миллиметр шкалы, отстоящей на 1 м от гальванометра, то пороговую цену деления также следует относить на такую же угловую величину, тогда

$$\varepsilon_{\text{г}} \left[\frac{\text{а}}{\text{мм/м}} \right] = \frac{\varepsilon_{\text{п}} \left[\frac{\text{э}}{\text{мм/м}} \right]}{\varepsilon_i \left[\frac{\text{э}}{\text{а}} \right]}. \quad (147)$$

При выборе гальванометров по чувствительности имеют в виду, что стабильность параметров микровариометра тем выше, чем больше глубина обратной связи. Однако увеличение глубины обратной связи в той же мере снижает чувствительность микровариометра по току. Гальванометр является как раз тем звеном, за счет которого можно скомпенсировать недостаток чувствительности, получающийся при введении глубокой обратной отрицательной связи.

По другому параметру гальванометра — частоте собственных колебаний — оцениваются его частотные искажения. Критерием выбора гальванометров по частотным свойствам является: собственная частота гальванометра выбирается в несколько раз

большей, чем собственная частота микровариометра. Практически необходимы гальванометры с частотами $f_{0\min} = 10 \text{ гц}$, $f_{0\max} = 40 \text{ гц}$.

Применение тех или иных гальванометров зависит от конкретных условий работы микровариометров. Для работы на обсерваториях могут быть использованы высокочувствительные гальванометры стационарного типа. При эксплуатации микровариационных приборов в экспедиционных условиях необходимы гальванометры-вибраторы, смонтированные в специальных осциллографах. Для многоканальной регистрации гальванометры монтируются в осциллографе в виде кассетных блоков. В табл. 2 приведены некоторые типы осциллографических гальванометров отечественного и зарубежного производства [14].

Из существующих однотипных гальванометров, имеющих, например, одинаковую собственную частоту, в таблице приведены те, которые имеют наивысшую чувствительность. Как и у магнитных датчиков, в гальванометрах между частотой собственных колебаний f_0 и чувствительностью $\frac{1}{c_i}$ существует противоречие, которое заключается в том, что нельзя одновременно увеличивать и то и другое. Для любых гальванометров, как и для магнитостатических датчиков, можно ввести параметр добротности $P = \frac{f_0^2}{c_i}$, который имеет некоторое предельное значение P_{\max} . Из приведенных в таблице гальванометров наибольшим P ($P = 18 \cdot 10^{10} \frac{\text{м.м/м}}{\text{сек}^2 \cdot \text{а}}$) обладает гальванометр фирмы «КИПП». По всей вероятности, это значение добротности близко к предельному.

В микровариометрах используются низкочастотные гальванометры с f_0 не выше 50 гц. Из таблицы видно, что по добротности отечественные низкочастотные гальванометры заметно уступают лучшим зарубежным гальванометрам. В области более высоких частот заметных преимуществ между обеими группами гальванометров нет.

Гальванометр не может быть включен непосредственно в анодную цепь усилительной лампы. Для этого применяют мостовые или компенсационные схемы, в которых гальванометр работает как нуль-индикатор. В результате такого включения гальванометра его цепь неизбежно шунтируется и в гальванометр поступает только часть энергии микровариометра. Коэффициент передачи шунта всегда меньше единицы.

Практически не всегда можно найти гальванометр с заданными характеристиками. Если не имеется гальванометра с расчет-

Таблица 2

$f_0, \text{гц}$	Постоянная по току $c_i \frac{a}{\text{мм/м}}$	Сопротивление рамки, Ом	Добротность $Q = \frac{f_0^2}{c_i}$	Наименование, тип	
10	$1 \cdot 10^{-8}$	150	$1 \cdot 10^{10}$	Серия ЭПО рамочный	Осциллографические гальванометры, производимые в СССР.
20	$1,7 \cdot 10^{-8}$	120	$2,3 \cdot 10^{10}$	М-1012 рамочный	
30	$2 \cdot 10^{-8}$	58	$4,5 \cdot 10^{10}$	ГБ-IV-V рамочный	
40	$7 \cdot 10^{-8}$	120	$2,3 \cdot 10^{10}$	М-1012 рамочный	
80	$1,4 \cdot 10^{-7}$	60	$4,6 \cdot 10^{10}$	„ „	
120	$3 \cdot 10^{-7}$	52	$4,8 \cdot 10^{10}$	ГБ-IV-V рамочный	
150	$5 \cdot 10^{-7}$	60	$4,5 \cdot 10^{10}$	М-1012 рамочный	
300	$2,5 \cdot 10^{-6}$	52	$3,6 \cdot 10^{10}$	ГБ-IV-V рамочный	
600	$4 \cdot 10^{-6}$	52	$9 \cdot 10^{10}$	„ „	
1 200	$2 \cdot 10^{-5}$	11	$7,2 \cdot 10^{10}$	МОВ-2 петлевой	
2 000	$7 \cdot 10^{-5}$	6	$5,7 \cdot 10^{10}$	„ „	
2 500	$1,5 \cdot 10^{-4}$	18	$4,1 \cdot 10^{10}$	ГБ-IV-V рамочный	
3 000	$2 \cdot 10^{-4}$	6	$4,5 \cdot 10^{10}$	МОВ-2 петлевой	
5 000	$5 \cdot 10^{-4}$	18	$5 \cdot 10^{10}$	ГБ-IV-V рамочный	
10 000	$3 \cdot 10^{-3}$	11	$3,3 \cdot 10^{10}$	ГБ-IV-V рамочный	
20	$5 \cdot 10^{-9}$	100	$8 \cdot 10^{10}$	„КИПП“ рамочный	
60	$2 \cdot 10^{-8}$	40	$18 \cdot 10^{10}$	„ „	
120	$1 \cdot 10^{-7}$	20	$14 \cdot 10^{10}$	„ „	
150	$2,6 \cdot 10^{-7}$	30	$8,7 \cdot 10^{10}$	„Мидвестерн“ рамочный	
300	$1,6 \cdot 10^{-6}$	30	$5,6 \cdot 10^{10}$	„ „	
500	$4,4 \cdot 10^{-6}$	30	$5,7 \cdot 10^{10}$	„ „	
1 000	$5,6 \cdot 10^{-5}$	30	$1,8 \cdot 10^{10}$	„ „	
2 500	$5,5 \cdot 10^{-5}$	4,8	$11,3 \cdot 10^{10}$	„Сименс“ петлевой	
3 000	$1,7 \cdot 10^{-4}$	2	$5,2 \cdot 10^{10}$	„Кембридж“ петлевой	
5 000	$4,6 \cdot 10^{-4}$	1,9	$5,4 \cdot 10^{10}$	„Сименс“ петлевой	
10 000	$1,7 \cdot 10^{-3}$	1,3	$5,9 \cdot 10^{10}$	„Кембридж“ петлевой	
17 000	$2,5 \cdot 10^{-3}$	1,5	$11,2 \cdot 10^{10}$	„ „	

ной собственной частотой, то чаще всего выбирают гальванометр с ближайшей повышенной частотой, так как последнюю всегда можно понизить до значения расчетной с помощью реактивных сопротивлений (индуктивностей, конденсаторов), определенным образом включенных в цепь гальванометра. Наиболее простым способом увеличения инерционности гальванометра является шунтирование его конденсатором, как показано на рис. 25.

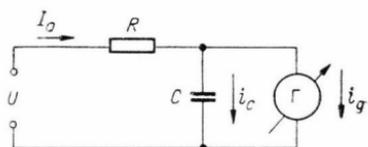


Рис. 25. Принципиальная схема согласования регистрирующего гальванометра с микровариометром.

Ток I_0 цепи гальванометра разветвляется на ток через конденсатор i_C и ток i_g через гальванометр

$$i_g = I_0 - i_C. \quad (148)$$

Угловая скорость движения рамки $\dot{\alpha}$ и электродвижущая сила e , возникающая на концах рамки, связаны, как известно, уравнением [53]

$$e = -\psi \dot{\alpha} \text{ или } \dot{e} = -\psi \ddot{\alpha}. \quad (149)$$

Через конденсатор будет течь ток согласно (149)

$$i_C = C \dot{e} = C \psi \ddot{\alpha}. \quad (150)$$

Подставив (148) и (150) в уравнение движения гальванометра, получим

$$\ddot{\alpha} (I + C \psi^2) P \dot{\alpha} + W \alpha = \psi I_0. \quad (151)$$

Из (151) непосредственно следует:

$$\omega_0^{2'} = \omega_0^2 \frac{1}{1 + \frac{C \psi^2}{I}}, \quad (152)$$

где $\omega_0^2 = \frac{W}{I}$ — собственная частота гальванометра без шунтирующей емкости.

В заключение рассмотрим пример выбора гальванометра для практически предельного случая магнитостатического метода измерений, когда $f_{0\max} = 10 \text{ гц}^*$.

* Понятие предела магнитостатического метода измерений относительно и зависит не только от частоты измеряемых колебаний, но и от их интенсивности. Здесь и во всех других случаях имеются в виду измерения, проводимые в средних широтах (40—60°), где интенсивность магнитных возмущений с периодами менее 1 сек не превышает 10^{-5} э.

Выберем датчик со следующими параметрами:

$f_0 = 10 \text{ гц}$, $C_0 = 0,01 \frac{\text{м.м./м}}{\text{г.а.м.м.а}}$ (или $C_0 = 0,002 \frac{\text{м.м.}}{\text{г.а.м.м.а}}$, поскольку $l = 0,2 \text{ м}$).

Коэффициент фотоэлектрического преобразования, как правило, не превышает $5 \frac{\text{м.а}}{\text{м.м}}$ и, следовательно, чувствительность микровариометра по току без обратной связи будет

$$c = c_0 \Phi = 0,01 \frac{\text{м.а}}{\gamma}.$$

Выберем минимальную глубину обратной связи

$$\frac{c'}{c} = \frac{1}{1 + c^2} = \frac{1}{5}, \quad c' = 0,2c = 0,002 \frac{\text{м.а}}{\gamma}.$$

Пусть пороговая цена деления определена величиной $\varepsilon_{11} = 0,005 \frac{\gamma}{\text{м.м./м}}$. Тогда из формулы (147) получим

$$\varepsilon_{\tau} = \frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_i} = 10^{-5} \frac{\text{м.а}}{\text{м.м./м}}; \quad \left(\varepsilon_i = \frac{1}{c_i} = 500 \frac{\gamma}{\text{м.а}} \right).$$

Принимая коэффициент шунтирования гальванометра равным 0,5, получим необходимую чувствительность гальванометра

$$\varepsilon'_{\tau} = \varepsilon_{\tau} 0,5 = 5 \cdot 10^{-9} \frac{\text{а}}{\text{м.м./м}}.$$

Для собственной частоты гальванометра выберем трехкратное значение f_0 датчика, т. е. $f_0 = 30 \text{ гц}$. Из табл. 2 данной частоте соответствует гальванометр ГВ-IV-B с постоянной по току $c_1 = 2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{а}}{\text{м.м./м}}$, т. е. его чувствительность оказывается в 4 раза ниже требуемой. Из зарубежных гальванометров необходимой чувствительностью обладает гальванометр «КИПП», но частота собственных колебаний у него несколько ниже (20 гц). Применяя гальванометр ГВ-IV-B ($f_0 = 30 \text{ гц}$), получим чувствительность микровариометра равной $0,02 \frac{\gamma}{\text{м.м./м}}$, что явно недостаточно для регистрации высокочастотных вариаций. Преодолеть эту трудность можно, вероятно, за счет увеличения коэффициента фотоэлектрического преобразования. Однако работа с экстремальными параметрами фотоэлектрического преобразователя отрицательно сказывается при измерениях более низкочастотных вариаций. Поэтому целесообразно в области высокочастотных магнитных измерений (1—10 гц) разрабатывать специальные конструкции микровариометров. Эти трудности практически снимаются, если частоту собственных колебаний датчика уменьшить в 2—3 раза.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

АППАРАТУРА ДЛЯ МИКРОВАРИАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ
И КОНСТРУКЦИИ
МИКРОВАРИАЦИОННЫХ
СТАНЦИЙ ТИПА ГГ42**

**Требования к конструкциям
микровариационных приборов
магнитостатического типа**

Магнитостатические системы принципиально позволяют измерять магнитные поля до миллиардных долей эрстеда, т. е. до тех величин, при которых начинают сказываться собственные шумы измерительной системы. В оптико-механических измерительных системах нижний предел измерений определяется броуновским молекулярным движением. В электромеханических системах, например, в магнитометрах с фотоэлектрическим преобразованием, нижний предел измерений определяется в основном шумами в электронной схеме, и этот предел трудно снизить до величины меньшей, чем 10^{-8} э. Практически же в магнитных микровариометрах уровень шумов колеблется от 10^{-8} до 10^{-7} э.

Главными достоинствами магнитостатического способа измерений являются достаточно высокая чувствительность и линейность регистрирующей аппаратуры в том диапазоне частот, который охватывает абсолютное большинство известных типов геомагнитных возмущений. Как показывает опыт микровариационных измерений, системы, основанные на магнитостатическом принципе, позволяют с весьма высокой степенью точности регистрировать все типы возмущений магнитного поля, за исключением высокочастотных колебаний (выше 5 гц). Невозмож-

ность измерения высокочастотных вариаций является следствием инерционности магнитных датчиков и представляет наиболее существенный недостаток магнитостатического способа измерений.

Принципиальная сторона магнитостатического метода измерений разработана сравнительно давно и достаточно полно. Однако разработки последних лет свидетельствуют о том, что остается еще много нерешенных вопросов магнитостатических измерений.

До недавнего времени техника макрвариационных измерений находилась на довольно низком уровне, не говоря о микрвариационных измерениях, которых вообще не существовало.

Большим прогрессом в этой области измерений следует считать разработку новых магнитостатических систем (В. Ф. Шеллинг, В. Н. Бобров) и электрических способов их стабилизации (Б. Е. Брюнелли), что позволило качественно повысить уровень магнитовариационных измерений и определило новое направление в микрвариационной технике.

На практике хорошо себя зарекомендовали магнитометры с фотоэлектрическим преобразованием, которые в последние годы заняли ведущее место среди других микрвариационных приборов: магнитометров с индукционными датчиками, флюксометрических измерительных систем и других. Это в значительной мере объясняется не только их метрологическими достоинствами, но и простотой конструкции и высокими эксплуатационными качествами.

Из названия «микрвариационный прибор», которым называются все магнитометры с фотоэлектрическим преобразованием, вовсе не следует, что эти приборы ограничены рамками измерения только микрвариаций. Магнитостатические датчики, являющиеся основой этих приборов, не могут «сортировать» действующее на них поле на микро- и макрвариации. Амплитудный диапазон микрвариационных приборов не ограничивает вариации с любой практически существующей интенсивностью и лишь от скорости протекания этих вариаций, т. е. от их периода зависит, с какой погрешностью эти вариации могут быть измерены. Влияние дрейфа нуля приводит к тому, что длиннопериодные вариации искажаются сильнее, чем короткопериодные. Но при этом предполагается равенство их амплитуд. Однако структура поля такова, что интенсивность геомагнитных вариаций, как правило, возрастает с увеличением периода (что является благоприятным моментом для использования микрвариационного прибора с целью их регистрации) и, следовательно, не совсем ясно, бу-

дут ли длиннопериодные вариации искажаться сильнее, чем вариации меньшего периода.

Во всяком случае, любой микровариометр, если позволяет его стабильность, может быть использован для измерения всех низкочастотных вариаций с периодами от долей секунды до нескольких часов вплоть до суток. Поэтому расширение частотного диапазона микровариометров является важнейшей задачей конструирования этих приборов. Решение этой задачи связано с выполнением широкого комплекса мероприятий, таких, например, как защита от утечек в условиях высокой влажности, повышение стабильности электрических параметров, введение температурной и электрической стабилизации и т. д.

Поскольку микровариационная аппаратура разрабатывалась в основном в соответствии с потребностями магнитотеллурических методов исследований, многие микровариационные установки первоначально строились с двумя магнитными измерительными каналами (для двух горизонтальных составляющих поля Земли). Позже выяснилось, что для полноты информации необходимо измерять также вертикальную компоненту вариаций магнитного поля.

Стало совершенно очевидным и то, что все три магнитных измерительных канала должны быть объединены в едином блоке для того, чтобы иметь дело не с тремя приборами, а с одним. Кроме того, такое объединение резко повышает компактность и другие характеристики аппаратуры.

Пока не существует единой точки зрения в отношении того, какие магниточувствительные системы следует применять в микровариометрах: с кварцевыми или металлическими подвесами. Несомненно, что базисные значения в течение продолжительного времени лучше сохраняются у кварцевых систем. Если же рассматривать не слишком большие интервалы времени, например не более суток, то различие между этими двумя типами магниточувствительных систем ничтожно. Микровариационные приборы, как известно, не предназначены для регистрации процессов продолжительностью более суток, так как этому препятствует дрейф нуля в электрической части схемы, и поэтому в смысле стабильности нуля-пункта не могут конкурировать с нормальными магнитографами, да и вряд ли есть необходимость в такой конкуренции.

Экспериментально проверено, что в диапазоне измерений микровариометра кварцевые магнитные системы не имеют существенных преимуществ перед системами на металлических подвесах (растяжках). Последние же значительно проще в изготовлении и удобнее в эксплуатации. Следовательно, в качест-

ве датчиков могут быть рекомендованы оба указанных типа магнитных систем.

Весьма ответственным узлом микровариационных приборов является оптическая система. От конструкции этого узла в значительной степени зависит экономичность прибора в отношении расходуемой энергии, а также линейность и стабильность измерений. Существенными преимуществами среди конструкций осветителей обладают проекционные осветительные системы, поэтому их применение в микровариометрах наиболее рационально.

Важнейшими показателями микровариационных приборов являются их экономичность, габариты и вес. Эти характеристики определяют сферу использования прибора, особенно в полевых исследованиях. Магнитотеллурические исследования все больше продвигаются в труднодоступные районы. Другие исследования, связанные с использованием микровариаций, также, как правило, проводятся в весьма отдаленных районах, например в Заполярье и в Арктике. Микровариационная аппаратура должна быть приспособлена для работы в районах, где ограничены или совсем отсутствуют возможности транспортировки аппаратуры и отсутствует широкая сеть энергоснабжения. Предпосылки для конструирования экономичных и компактных микровариационных приборов имеются, но сделано в этом направлении еще мало.

Одной из трудных задач, которая возникает при конструировании магнитометров с фотоэлектрическим преобразователем, является защита их от влияния неблагоприятных метеорологических факторов (влажность, температура), от механических помех (ветер, микросейсмические колебания грунта) и других факторов. Особенно отрицательно сказывается на работе аппаратуры высокая степень влажности и резкие колебания температуры вследствие того, что эти факторы могут вызывать утечки в высокоомных цепях и конденсацию влаги на стеклах оптической системы.

Важным вопросом конструирования микровариационных приборов является повышение эксплуатационных характеристик аппаратуры, таких, например, как сокращение времени на развертывание, установку и настройку приборов на местности, возможность быстрого устранения неисправности или замены вышедших из строя элементов и т. д.

Учитывая трудности измерения высокочастотных колебаний магнитного поля в диапазоне от 1 до 10 *гц*, целесообразно для этого диапазона конструировать специальные приборы или разрабатывать микровариационные установки со сменным ком-

идеями высокочастотных и низкочастотных датчиков. В последнем случае могут быть использованы уже существующие установки.

Блок-схема микровариационной станции ГГ42

Микровариационная станция типа ГГ42 предназначена для одновременной регистрации вариаций трех взаимно перпендикулярных компонент геомагнитного поля H , D , Z и двух горизонтальных компонент теллурического поля E_1 и E_2 в стационарных и экспедиционных условиях.

Блок-схема станции ГГ42 приведена на рис. 26. Элементами этой схемы являются три магнитных измерительных канала, не имеющих между собой принципиальных отличий, и два одинаковых электрических канала. Каждый магнитный канал включает следующие узлы:

1. Датчик магнитного поля (H , D или Z).

2. Фотоэлектрический преобразователь (ФП). В этом узле объединены: оптический преобразователь, фотоприемник и ламповый усилитель постоянного тока.

3. Фильтр RC короткопериодических колебаний (Φ).

4. Ламповый усилитель фильтра (Ψ).

5. Гальванометрический регистратор (Γ_H , Γ_D или Γ_Z).

Регистратор включает гальванометр, регулятор чувствительности и приспособление для записи сигналов.

Магнитные каналы питаются от общего блока питания БП. Электрический канал состоит из заземленных электродов M_1N_1 (или M_2N_2), подводящих линий, компенсаторов постоянной а. д. с. КИ и регистраторов Γ_{E_1} и Γ_{E_2} .

Регистраторы для магнитных и электрических каналов выбираются одинаковыми и конструктивно объединяются в общем блоке — гальванометрическом осциллографе.

В станции имеется также общее градуировочное устройство.

Конструктивными элементами микровариационной станции ГГ42 являются: 1) магнитоэлектрические датчики; 2) блок магнитных датчиков и фотоэлектрического преобразования;

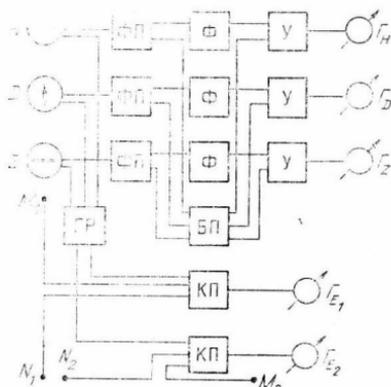


Рис. 26. Блок-схема микровариационной станции типа ГГ42.

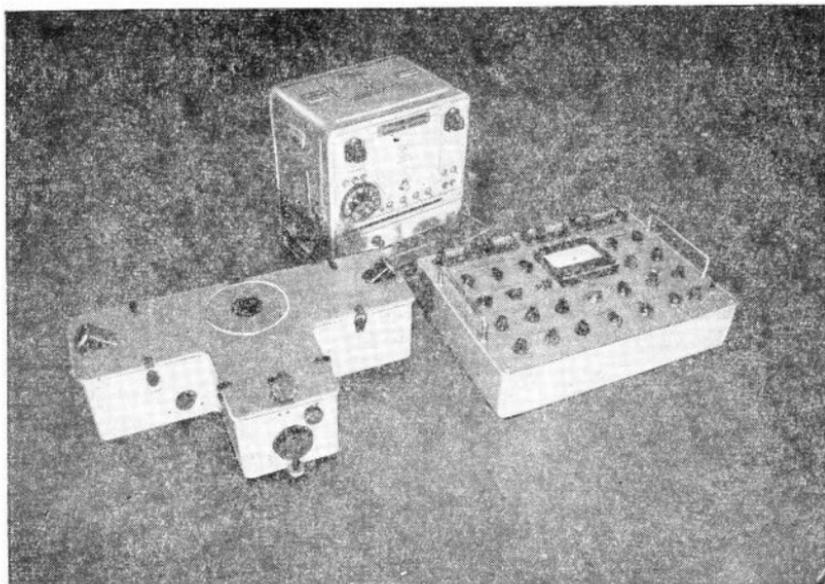


Рис. 27. Общий вид основных узлов микровариационной станции ГГ42: блока магнитных датчиков, пульта управления и контроля и осциллографа.

3) пульт управления и контроля; 4) блок источников питания; 5) гальванометрический осциллограф; 6) эталонировочное и другие вспомогательные приспособления.

В настоящей главе будут рассмотрены две модели микровариационной станции — ГГ42-1 и ГГ42-2, имеющие одинаковое назначение, но отличающиеся некоторыми техническими характеристиками. Общий вид основных блоков станций типа ГГ42 показан на рис. 27.

Микровариационная станция ГГ42-1. Электрическая схема

Принципиальная электрическая схема станции ГГ42-1 показана на рис. 28. Рассмотрим назначение отдельных ее частей.

Блок датчиков и фотоэлектрического преобразования. В этом блоке размещены три магнитных измерительных канала H , D и Z . Изменения магнитного поля в трех взаимно перпендикулярных направлениях фиксируются тремя датчиками и здесь же преобразуются в электрические сигналы. Блок датчиков является выносным и управляется в процессе измерений дистанционно. Электрическая связь с остальной

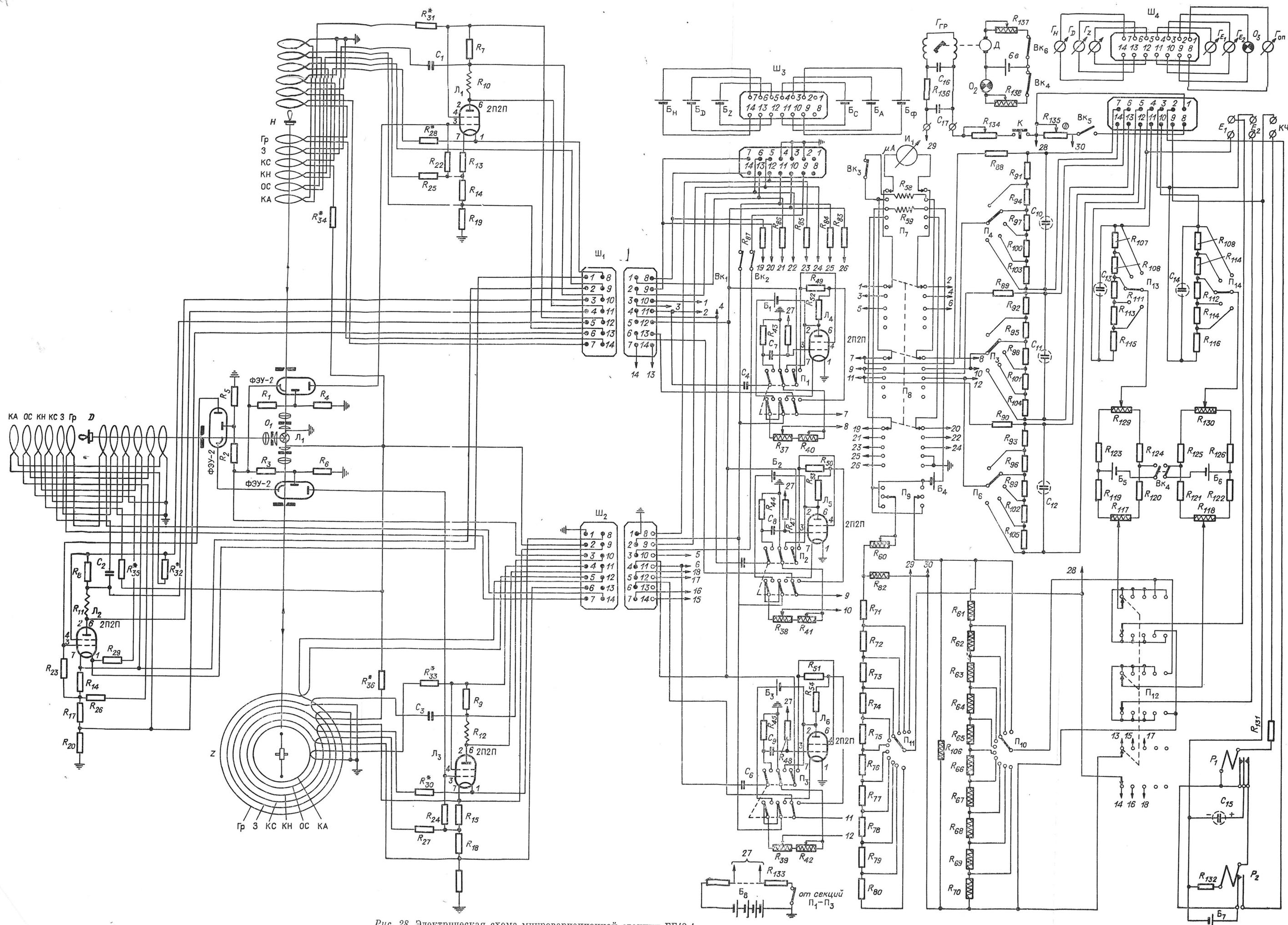


Рис. 28. Электрическая схема микровариационной станции ГГ42-1.

частью схемы осуществляется с помощью длинного кабеля (30 м) через разъемы Ш₁ и Ш₂ типа РША-14.

Принципиальная схема для каждого магнитного канала одинакова, поэтому рассмотрим работу и назначение элементов схемы на примере одного магнитного канала, например *H*. Общим элементом схемы, размещенной в блоке магнитных датчиков, является лишь электрическая лампа O_1 , питание для которой подается через разъемы Ш₂ и Ш₃ от источника $B_c = 2,5$ в.

Фотоумножителями в магнитных каналах являются фотоумножители ФЭУ-2. Анодную цепь фотоумножителя (для *H*-канала) составляют сопротивления R_{22} , R_{16} , R_{19} , R_4 и участок эмиттер — анод ФЭУ-2.

В результате модуляции светового потока, создаваемой датчиком под влиянием вариаций магнитного поля, в анодной цепи ФЭУ-2 будет течь постоянная и переменная составляющие фототока. Напряжение, создаваемое фототоком на сопротивлении $R_{22} = 20 - 50$ Мом, прикладывается к управляющей сетке лампы 2П2П. При этом постоянная составляющая напряжения используется для отрицательного смещения на управляющей сетке лампы: в этом состоит одно из преимуществ фотоумножителей перед фотоэлементами, которые требуют батарейного смещения.

Усилитель, выполненный на лампе 2П2П, охвачен обратной отрицательной связью по току (сопротивления R_{13} , R_{22}). Сопротивления R_7 и R_{10} представляют анодную нагрузку усилительного каскада, из них R_{10} выполняет роль шунта для стрелочного прибора, включаемого в анодную цепь лампы. С сопротивления R_{19} снимается напряжение, пропорциональное сигналу, и подается далее по кабелю на регистрирующий прибор. В схему магнитного канала входят также следующие цепи: а) цепь обратной отрицательной связи по магнитному полю. Сюда входят сопротивления R_{16} , R_{25} и обмотки обратной связи OC ; б) цепь демпфирования, которая включает в себя конденсатор C_1 , обмотку затухания Z , батарею анодного напряжения B_A и сопротивление R_7 ; в) цепь автокомпенсации дрейфа анодного напряжения, элементами которой являются обмотка KA , сопротивление R_{31} и батарея анодного напряжения B_A ; г) цепь автокомпенсации дрейфа накального напряжения — обмотка KH , сопротивление R_{23} и батарея накала B_H ; д) цепь автокомпенсации дрейфа напряжения осветителя, куда входят обмотка KC , сопротивление R_{34} и батарея B_C . Работа перечисленных выше цепей рассмотрена во II главе.

Питание для фотоумножителей ФЭУ-2 подается от батареи B_F через разъемы Ш₃ и Ш₁. Сопротивления R_1 и R_4 являются делителями напряжения питания ФЭУ-2.

К магнитным измерительным каналам следует отнести также цепи компенсации постоянной составляющей сигнала, расположенные в пульте управления и контроля. Для компенсации этой составляющей служит цепь R_{37} (потенциометр), R_{40} (реостат) и батарея B_2 . К точкам 7 и 8, к которым подходит напряжения с сопротивления R_{19} и потенциометра R_{37} , подключается стрелочный индикатор Π_1 , служащий для контроля уровня компенсации. После полной компенсации постоянной составляющей к точкам 7—8 подключается регистрирующий гальванометр Γ_H через разъем Π_4 .

Следует отметить, что компенсационная схема включения гальванометра будет тем чувствительнее, чем меньше сопротивление компенсирующей цепи по сравнению с выходным сопротивлением, которое в рассматриваемом случае равно R_{19} .

Фильтры короткопериодических колебаний. Для всех измерительных магнитных каналов схемы фильтров одинаковы. Для канала И фильтр КПК включает следующие элементы. Конденсаторы C_4 , C_7 и сопротивления R_{43} , R_{46} образуют двухзвенный Г-образный фильтр верхних частот с $n=1$, т. е. $C_4=C_7$ и $R_{43}=R_{46}$. Постоянная фильтра $RC=100$ сек. Вход фильтра подключается к аноду лампы первого усилительного каскада, выход — к управляющей сетке специального лампового усилителя. Усилитель фильтра КПК собран на лампе 2П2Н. Этот каскад выполняет в основном согласующие функции между высокоомным выходом фильтра ($R_{46}=10$ Мом) и низкоомным регистрирующим гальванометром.

Напряжение сигнала снимается с части анодной нагрузки (R_{52}), причем постоянная составляющая сигнала снимается тем же компенсатором R_{37} , R_{40} , питание которого в данном случае осуществляется от гальванического элемента B_1 — «Сатурн». Включение фильтра, подача анодного и накального напряжения на ламповый усилитель, переключение компенсатора и гальванометра производится одним переключателем Π_1 (фильтр КПК). Отрицательное смещение для ламповых усилителей подается от делителя R_{137} , к которому приложено напряжение от батареи B_2 . Включение и выключение фильтров КПК не сопровождается уходом световых индексов из нулевого положения, т. е. дополнительная подстройка магнитного канала при этих операциях не требуется.

Электрические измерительные каналы. Микровариационная станция ГГ42 включает кроме трех магнитных измерительных каналов (трех микроваркометров) также два канала для измерения разности потенциалов земных токов. Электрическое (или теллурическое) поле Земли определяется разно-

стью потенциалов между двумя заземлениями, отнесенной к расстоянию между этими заземлениями. Интенсивность теллурического поля в большей части случаев оказывается достаточной для того, чтобы вариации этого поля записывать без дополнительного усиления непосредственно гальванометром, включаемым между двумя заземлениями. Исключения составляют те случаи, когда сопротивление заземления велико; в этих случаях прибегают к усилению теллурических токов.

В станции ГГ42 усилители для E -каналов не предусмотрены. Каналы для измерения вариаций напряженности электрического поля Земли включают следующие цепи. Компенсатор постоянной составляющей электрического поля R_{129} , R_{123} , R_{124} , R_{119} , R_{120} , R_{117} и батареи B_5 (для канала E_1) предназначен для выравнивания потенциалов между двумя заземлениями. Потенциометры R_{117} и R_{129} служат для грубой и точной компенсации. Провода, идущие от заземлений, подключаются к клеммам ΔV_1 . Следовательно, регистрирующий гальванометр G_{E_1} , компенсатор постоянной э.д.с. и лишние заземления образуют последовательный контур. Этот контур периодически разрывается для подачи в него градуировочных импульсов напряжения. Эта операция осуществляется переключателем Π_{12} . Оба E -канала совершенно подобны друг другу.

Схема регистрации состоит из шести магнитоэлектрических гальванометров, применяемых в осциллографах серии ЭНО и ФР*. Пять гальванометров предназначены для регистрации трех магнитных и двух электрических составляющих. Эти гальванометры обозначены соответственно через G_H , G_D , G_Z , G_{E_1} и G_{E_2} . Каждый гальванометр имеет «универсальный пункт». Для H -канала, например, этот пункт включает набор сопротивлений R_{91} , R_{94} , R_{97} , R_{103} , R_{106} . Универсальность пункта состоит в том, что эта цепь сопротивлений создает необходимый режим усиления гальванометра и одновременно служит для изменения его чувствительности. Переключение чувствительности гальванометра осуществляется переключателем Π_4 (аналогично и в других каналах). Согласование гальванометра по частотным параметрам производится с помощью сопротивления R_{88} и конденсатора C_{10} .

К электрической схеме осциллографа относится также осветительная лампа O_2 и электродвигатель лентопротяжного механизма. Сила света осветительной лампы регулируется реостатом

* В ГГ42-1 использовались несколько измененные гальванометрические осциллографы типа ЭНО-8, ФР-5, выпускаемые для электроразведочных методов.

R_{138} , тумблер Вк служит для включения лампы. Скорость двигателя регулируется реостатом R_{137} , включение двигателя производится тумблером Вк. Питание для лампы и двигателя поступает от аккумуляторной батареи на 6 в.

В одной из опытных конструкций станции ГГ42-1 осуществлен механический градуировочный генератор, который конструктивно объединен с лентопротяжным механизмом осциллографа. Градуировочный генератор $I_{гр}$ представляет торондальную двухсекционную обмотку (статор) с $n=6000$ витков и магнитный ротор, выполненный в виде круглого цилиндра, сжатого в направлении диаметра. Ротор приводится во вращение лентопротяжным механизмом и возбуждает в обмотке переменное гармоническое напряжение низкой частоты — около 0,5 гц, которое и используется для градуирования магнитных каналов. Гальванометр $I_{оп}$ предназначен для контроля величины и частоты градуировочного тока. Для сглаживания генерируемой синусоиды служит фильтр $C_{16}-C_{17}-R_{136}$. Амплитуда тока генератора регулируется сопротивлением.

Схема градуировки. При градуировке определяется цена деления измерительных каналов. Так как параметры в микровариационной аппаратуре со временем не остаются постоянными и, кроме того, их даже приходится изменять в процессе измерений, то градуирование аппаратуры приходится делать довольно часто. Основным способом градуирования микровариометров и других магнитометров является включение постоянных сигналов известной амплитуды. Этот способ применяется и в микровариационной станции ГГ42. Существенный недостаток этого способа заключается в том, что прямоугольный импульс на фоне вариаций не всегда можно четко выделить. Еще сложнее обстоит дело в случае применения фильтров. В этом смысле градуирование гармоническим сигналом заданной частоты представляло бы более универсальный способ. Однако методика и устройство для такого способа пока недостаточно разработаны.

Опорный градуировочный ток для подачи прямоугольных импульсов на магнитные и электрические измерительные каналы протекает в контуре R_{59} — батарея B_4 (элемент «Сатурн») — $R_{60}-R_{82}-R_{106}$ и контролируется с помощью стрелочного индикатора I_1 , подключаемого параллельно шунту R_{59} . Переменным сопротивлением R_{60} производится установка опорного тока на заданную отметку шкалы I_1 . Отклонение прибора на полную шкалу (100 делений) соответствует протеканию опорного тока величиной 10 ма. Переключатель P_9 изменяет направление тока (изменение полярности градуировочного импульса). Набор градуировочных импульсов для магнитных каналов

с амплитудами от 0,25 до 50 *гамм* осуществляется переключателем Π_{11} . Градуировочные обмотки магнитных каналов Γ_p подключаются к переключателю Π_{12} (оцифрованы 13—14, 15—16, 17—18) и включаются последовательно в токовую цепь R_{82} , R_{71} — R_{80} . От величины сопротивления этой цепи зависит амплитуда магнитного импульса в градуировочной обмотке.

Выбор величины градуировочных импульсов напряжения для электрических каналов производится переключателем Π_{10} . Каждое из сопротивлений делителя R_{61} — R_{70} подобрано таким образом, чтобы опорный ток, протекая через него, создавал падение напряжения 1*мв*. Включение сопротивлений R_{61} — R_{70} в цепь E -каналов производится переключателем Π_{12} . Так как полное сопротивление цепи R_{61} — R_{70} (с учетом параллельно включенного сопротивления R_{106}) составляет всего 1 *ом*, то включение цепи или части ее в цепь E -канала не может заметно влиять на сопротивление измерительной цепи.

Способ градуирования с помощью переменного напряжения низкой частоты в общих чертах был рассмотрен выше.

С х е м а к о н т р о л я. Контроль за функционированием микровариационной станции осуществляется с помощью двух переключателей Π_7 , Π_8 и стрелочного индикатора H_1 (М-24, 0-100 *мкв*). Индикатор может быть подключен к следующим цепям:

а. В цепь анода усилителя лампы (точки 1—2, 3—4 и 5—6). Этим осуществляется контроль за рабочим током усилительных каскадов, который в процессе регистрации должен изменяться лишь в пределах линейного участка характеристики лампы; производится контроль возможных нарушений в работе магнитных каналов: появление утечек, потеря эмиссии фотопомножителя или электронной лампы, нарушение режима питания фотоэлектрического преобразователя.

б. В цепь компенсации постоянной составляющей магнитного канала (подключение к точкам 7—8, 9—10 и 11—12). В этих положениях по стрелочному прибору легко определяется знак постоянной составляющей, которая затем компенсируется до нуля.

в. В контур опорного градуировочного тока (параллельно сопротивлению R_{59}).

г. К цепям питающих напряжений (к точкам 19—20, 21—22, 23—24, 25 и 26) для измерения величины этих напряжений.

Отметчик времени состоит из двух реле P_1 (задающего) и P_2 (спускового), сопротивлений R_{131} , R_{132} , конденсатора C_{15} и элемента B_7 типа «Сатурн». Контакты $KЧ$ замыкаются контактными часами, при этом напряжение, вырабатываемое от-

Таблица 3

Обозначение по схеме	Тип цеточника	Номинальное напряжение, в	Номинальная емкость а-г	Предназначен для питания	Номинальные допустим. значения напряжений, в	Погрешаемый ток, а	Продолжительность работы в пределах номинально допустимых напряжений, час	Примечание
Бн	2НКН24	2,5	24	Накала усилительной лампы II-канала	2,5—2,3	0,03	400	
Бл	2НКН24	2,5	24	D-канала	2,5—2,3	0,03	400	
Бз	2НКН24	2,5	24	Z-канала	2,5—2,3	0,03	400	
Бс	2НКН24	2,5	24	Осветители; для компенсации ценей;	2,5—2,3	0,31 0,38	100	При выключенных фильтрах и двух аккумуляторах 2НКН24 При включ. фильтрах и двух аккумуляторах 2НКН24
				Накалов усилительных ламп Л ₄ , Л ₅ и Л ₆ при включении фильтров КПК			50	
				Для анодного питания ламп Л ₁ , Л ₂ и Л ₃		0,01		При выкл. фильтрах КПК

Бл	ГРМЦ-69	70	—	Для анодного питания ламп Л ₄ , Л ₅ и Л ₆ при включенных фильтрах	70—64	0,015	При включ. фильтров КПК
БФ	ПМШГ-225	220	0,15	Фотоумножителей ФУМ-2	220—200	10 ⁻⁴	До конца срока годности
Б ₁ Б ₂	„Сатурн“ „Марс“	1,6	—	Компенсационных цепей ламповых усилителей Л ₁ , Л ₂ и Л ₃	1,6—1,4	0,005	100 До конца срока годности
Б ₃ Б ₄	„Сатурн“ „Марс“	1,6	—	Градуировочного устройства	1,6—1,3	0,01	
Б ₅ Б ₆	„Сатурн“ „Марс“	1,6	—	Компенсационных цепей электродных ламп Л ₁ и Л ₂	1,6—1,3	0,01	50—100
Б ₇	„Сатурн“ „Марс“	3,2	—	Отметки во времени	3,2—2,6	0,005	До конца срока годности
Б ₈	РЦ-55	7,5	0,5	Для смещения ламп Л ₁ , Л ₂ и Л ₃	Подбирается		2 элемента Последоват. 3 элемента РЦ
Б ₉	ЖН-100	6	100	Для питания электро-двигателя и осветителя осциллографа	6,0	1,2	60

метчиком, подается на лампочку O_3 , которая находится в осциллографе. Время вспышки лампочки определяется постоянной цепи R_{132} , C_{15} и не зависит от длительности замыкания часовых контактов. В результате вспышки на осциллографической фотобумаге засвечивается тонкий поперечный штрих.

Источники питания. Комплект питания для микровариационной станции состоит из четырех аккумуляторов типа 2НКН24 (напряжение 2,5 в, емкость 24 а-ч), обозначенных на схеме B_H , B_D , B_Z и B_C , анодной батареи на 65—70 в — B_A и батареи питания фотоумножителей на 220 в — B_Φ . Кроме того, в схеме станции имеется семь элементов типа «Сатурн» B_1 — B_7 напряжением 1,6 в и батарея смещения B_3 напряжением 6 в из элементов типа РЦ.

Осциллограф питается от отдельного аккумулятора типа 3-СТ или ЖН напряжением 6 в и емкостью 70—100 а-ч. В табл. 3 даны основные характеристики и режимы работы источников питания, применяемых в микровариационной станции ГГ42.

К а б е л ь, р а з ь е м ы. Соединение отдельных блоков станции осуществляется с помощью кабелей и разъемов. Блок датчиков соединяется с пультом управления и контроля с помощью двух штепсельных разъемов Π_1 и Π_2 типа РША-14 и одного кабеля типа ТРВКШ длиной 30 м, раздвоенного на концах. Кабель имеет 45 изолированных медных жил. К контактам 1 и 2 штепсельного разъема Π_2 подходят по 5 жил. Это делается для уменьшения сопротивления проводов, подводящих напряжение для осветителя. К остальным контактам припаиваются по 1 или 2 жилы.

Питание для микровариационной станции подводится гибким 12-жильным кабелем через разъем Π_3 типа РША-14. Для включения света и питания для ФЭУ-2 на пульте имеются два дополнительных тумблера B_{K1} («Свет») и B_{K2} («ФЭУ»).

Измерительные каналы соединяются с осциллографом гибким 14-жильным кабелем через разъем Π_4 типа РША-14. Пять пар проводов подходят к регистрирующим гальванометрам G_H , G_D , G_Z , G_{E_1} и G_{E_2} , одна пара к лампе отметчика времени и одна — к опорному гальванометру $G_{оп}$.

В табл. 4 приведены основные значения электрических параметров схемы ГГ42-1 и их допустимые отклонения при номинальном режиме питания.

Конструкция магнитоэлектрических датчиков

Выше отмечалось, что в микровариационной станции ГГ42 применяются два типа магнитных датчиков: кварцевые магнит-

Таблица 4

Электрические параметры схемы ГГ42-1	Номинальные значения и пределы допустимых отклонений
Ток фотоумножителя ФЭУ-2 при полном наведении светового пиндекса в отверстие диафрагмы	$i_{\phi} \geq 0,5 \text{ мкА}$
Анодный ток ламп Л ₁ , Л ₂ и Л ₃ при нулевом потенциале управляющей сетки (напряжение на фотоумножитель и осветитель отключено)	$i_{a\text{max}} = 5 \text{ мА} \pm 5\%$
Анодный ток в лампах Л ₁ , Л ₂ и Л ₃ при полностью наведенных световых пиндексах в отверстия диафрагм ФЭУ (напряжение на ФЭУ подано)	$i_a = 0$
Номинальный рабочий ток ламп Л ₁ , Л ₂ и Л ₃ и допустимые пределы его изменения в процессе измерений	$i_{a0} = 3,0 \pm 1,0 \text{ мА}$
Анодный ток в лампах Л ₄ , Л ₅ и Л ₆ при нулевом потенциале на управляющей сетке (смещение на сетку отключено)	$i_{a\text{max}} = 4,0 \text{ мА} \pm 10\%$
Номинальный рабочий анодный ток в лампах Л ₄ , Л ₅ и Л ₆ при поданном смещении	$i_{a0} = 2,5 \text{ мА} \pm 5\%$
Опорный градуировочный ток	$i_{\text{гр}} 10 \text{ мА} \pm 1\%$
Параметр обратной связи	$1 + \beta c = 10$
Значения шкалы индикатора М-24 при полном отклонении стрелки (на 100 делений):	
а. При измерении анодных токов	$10 \text{ мА} \pm 1\%$
б. При измерении тока в цепи компенсации магнитных каналов (шунт R ₅₈ выключен)	$5 \text{ мА} \pm 5\%$
То же, шунт R ₅₈ выключен	$100 \text{ мкА} \pm 1\%$
в. При измерении опорного градуировочного тока	$10 \text{ мА} \pm 1\%$
г. При измерении напряжения накала на осветителе и на лампах Л ₁ , Л ₂ и Л ₃	$5 \text{ в} \pm 1\%$
д. При измерении анодного напряжения	$100 \text{ в} \pm 1\%$

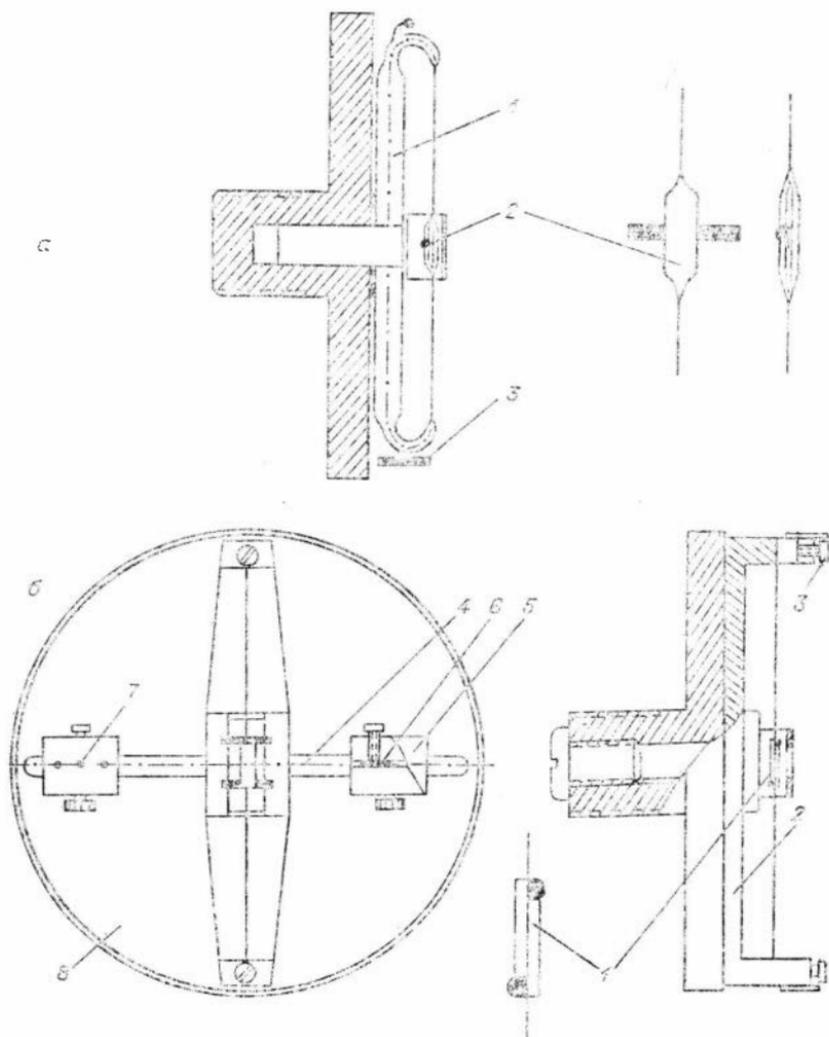


Рис. 29. Конструкции магнитостатических датчиков:

а — кварцевая магнитная система, б — магнитная система на ленточных металлических растяжках.

Кварцевые магнитные системы (конструкция, технология изготовления и настройка) достаточно подробно описаны в литературе [10, 74]. Дадим лишь краткую характеристику этих систем. Чувствительный элемент (рис. 29, а) кварцевой магнитной системы подвешен на тонкой кварцевой нити, которая является одной из сторон прямоугольной кварцевой рамки 1. Три другие, более утолщенные, стороны этой рамки служат каркасом магниточувствительного элемента 2, состоящего из магнита ($l=8-10$ мм, $d=1$ мм и $M=5-6$ ед. CGSM) и зеркальца. Зеркало также сделано из кварца и вместе с кварцевым стерженьком — держателем магнита — приварено к нити. Температурная компенсация осуществляется с помощью двух антипараллельных магнитов с различными температурными коэффициентами или одним магнитом, имеющим нулевой температурный коэффициент.

Влияние дестабилизирующих факторов здесь сведено к минимуму за счет высокой механической стабильности кварца и за счет сварного соединения деталей магнитной системы. В микроварнационной станции ГГ42 кварцевые магнитные системы заключены в цилиндрические домики, имеющие внутренний и внешний диаметры соответственно 80 и 84 мм. Одно из оснований домика служит для крепления кварцевой рамки и крепления самого домика к корпусу блока датчиков, другое — имеет круглое, застекленное отверстие ($d=20$ мм) для прохода светового луча к зеркалу магнитной системы. Для отвода отраженных бликов в сторону от отверстия диафрагмы фотомножителя стекло в отверстии домика крепится под углом к плоскости основания. Конструкция домика достаточно герметична.

Рассмотрим конструкцию датчика на ленточных растяжках (рис. 29, б). В качестве подвесов магниточувствительного элемента используются плоские ленточные растяжки из бериллсодержащей бронзы, имеющие удельный противодействующий момент $0,04-0,05$ мг·см/90° на 100 мм длины растяжки. Магниточувствительный элемент представляет собой симметричную относительно растяжки конструкцию, состоящую из двух зеркал и двух магнитов 1. Магниты уложены в пазы, образованные за счет продольного смещения зеркал относительно друг друга. Плоскость растяжки параллельна плоскости зеркал. Подвижная часть, т. е. зеркала и магниты, тщательно сбалансирована по весу относительно оси вращения, роль которой выполняет растяжка. Наиболее слабым местом существующих конструкций на металлических растяжках (это относится и к гальванометрам и к магнитным системам) является способ крепления растяжек к несущему каркасу. Чаще всего используют пайку в сочетании с пружинным натяжением. Стабильность такого крепления безус-

ловно невелика. В рассматриваемой конструкции датчика осуществлено жесткое крепление концов растяжки. В вертикальных стойках П-образного латуниного каркаса 2 просверлены соосные отверстия. Растяжка пропускается через отверстия и своей плоскостью прижимается к образующим цилиндрических отверстий с помощью втулочек, которые подогнаны по размеру отверстия. Надежность крепления обеспечивается тем, что растяжка оказывается прижатой на сравнительно большой длине, что к тому же гарантирует растяжку от деформаций. Необходимое натяжение растяжки производится следующим образом. Каркас укрепляется так, чтобы растяжка была направлена вертикально. Нижний конец растяжки освобождается и к нему прикрепляется грузик, соответствующий оптимальному натяжению. После того, когда убедятся, что растяжка не перекручена, т. е. ее плоскость параллельна плоскости кронштейна и ничто не препятствует ее натяжению, нижний конец растяжки с помощью втулочки стопорного винта 3 зажимают. Обязательным условием данной конструкции является то, чтобы растяжка датчика в нормальном поле была полностью раскручена. Это требование выполняется здесь сравнительно просто: малейшие искривления плоской растяжки обнаруживаются довольно легко. Подвижная система датчика имеет ограничитель (демпфер), который на рисунке не показан. Для температурной стабилизации магнитной системы датчика компенсации нормального поля и регулирования чувствительности имеются специальные магниты, которые в процессе настройки датчика могут передвигаться в каретках 5 вдоль кварцевой шины. Кварцевая шина круглого сечения 4 запрессована своей средней частью в отверстие несущего каркаса. Магнит 7 направлен вдоль измеряемой компоненты поля (перпендикулярно измерительным магнитам). Этот магнит служит для создания нулевого поля в месте расположения измерительных магнитов, и поскольку он обладает нулевым температурным коэффициентом, то одновременно осуществляет температурную стабилизацию датчика. Другой магнит 6 направлен параллельно измерительным магнитам и служит для регулирования чувствительности датчика. Этот магнит также обладает нулевым температурным коэффициентом. Обе каретки с магнитами 6 и 7 после настройки жестко закрепляются на кварцевой шине. В соответствии с выведенными в главе V условиями (143), (144) и (145) можно осуществлять температурную стабилизацию датчика с помощью двух магнитов, обладающих различными температурными коэффициентами. В этом случае можно обходиться без кварцевой шины, закрепляя каретки с магнитами непосредственно на основании домика магнитной

системы. Однако настройка датчика по этому способу сложнее, чем в рассматриваемом способе. Каркас 2, несущий на себе магнитную систему и кварцевую шину с магнитами 6 и 7, крепится к основанию 8 цилиндрического домика. Основание 8 имеет нарезной выступ для крепления всего домика. Отверстие в выступе служит для крепления эталонировочного кольца. Основание 8 позволяет крепить к нему также кварцевую магнитную систему. Достоинствами рассмотренной конструкции датчика являются: простая технология изготовления, возможность замены магнитной системы в случае ее обрыва и возможность настройки на любое нормальное поле. Причем две последние операции (что весьма существенно) могут быть осуществлены в экспедиционных условиях без помощи квалифицированных специалистов. Измерения температурных свойств датчиков с металлическими растяжками подтверждают их высокую температурную стабильность. Нагрев при испытаниях датчиков производился до температуры 150°C , при этом необратимых процессов не обнаружено: система при охлаждении возвращается в первоначальное положение. Дрейф нуля для H -датчиков оценивается величиной в среднем около $0,2$ гамма/град, для Z -датчиков — $0,5$ гамма/град. Эти величины не предельные. Приведем некоторые технические данные датчиков рассмотренной конструкции.

Техническая характеристика
магнитостатических датчиков на металлических растяжках

1. Цена деления	$\varepsilon = 2-5$ $\frac{\text{гамма}}{\text{мм/м}}$
2. Частота собственных колебаний	$f_0 = 2-3$ гц
3. Вес магнитной системы	$P = 0,2-0,25$ г
4. Магнитный момент	$M = 6-10$ CGSM
5. Момент энергии	$J = 0,015-0,018$ гс \cdot м 2
6. Удельный противодействующий момент растяжки	$W = 0,04-0,05$ мг \cdot см/90 $^{\circ}$ на длине 10 см
7. Длина рабочей части растяжки	31 мм
8. Материал растяжки	Бериллиевая бронза Бр-Б2
9. Материал магнитов	Сплав «викаллой» 52КФБ
10. Размеры домика:	
внешний диаметр	84 мм
внутренний диаметр	80 мм
высота (снаружи)	30 мм
высота (пзнутри)	16 мм

Устройство блока магнитных датчиков

Блок магнитных датчиков и фотоэлектрического преобразования включает следующие узлы: корпус блока, датчики с коль-

цевыми каркасами, оптическую систему, кожухи для ФЭУ-2 и монтажную плату для электрического монтажа. Все детали блока магнитных датчиков немагнитны, за исключением подвижных и неподвижных магнитов датчиков. Конструкция блока представлена на рис. 30. Корпус блока магнитных датчиков 3 представляет Т-образную коробку с массивным плоским дном и крышкой 4. Для возможности свободного доступа к элементам и узлам прибора крышка крепится к корпусу шарнирно. Герметичность соединения крышки с корпусом обеспечивается прокладкой из вакуумной резины, крышка притягивается к корпусу с помощью четырех откидных замков 15. В целом корпус в закрытом состоянии совершенно герметичен. Остатки влаги в корпусе поглощаются специальным осушителем 14.

Корпус опирается на три установочных винта 13 со стопорными гайками. С помощью установочных винтов прибор нивелируется по уровню. Установочные винты в соответствии с формой корпуса расположены в плане по углам треугольника со сторонами 45, 45 и 50 см. Такое расположение опор, а также небольшая высота корпуса (центр тяжести блока магнитных датчиков всего лишь на 8—10 см выше точек опор) обеспечивает хорошую устойчивость прибору при механических колебаниях (вибрации грунта, ветровые колебания и т. д.).

На крышке корпуса имеются застекленные люки для визуального наблюдения за положением световых индексов при настройке прибора на свету; имеется также застекленное гнездо с отверстием для наблюдения за уровнем, куда вставляется также буссоль для ориентирования прибора по азимуту. На вертикальной стенке корпуса крепятся два разъема РША-14 для подключения кабеля.

В станции ГГ42 применены датчики 2 съемного типа. Их крепление осуществляется с помощью гаек к торцевым частям корпуса. *H*- и *D*-датчики крепятся к вертикальным стенкам корпуса, *Z*-датчик — к основанию корпуса. Места крепления датчиков закрываются заглушками, имеющими резьбовую нарезку и уплотнительные прокладки. Плоскости трех датчиков строго перпендикулярны друг к другу. Конструкция всех датчиков одинакова. Здесь применяются как кварцевые магнитные системы, так и системы на металлических подвесках. Небольшое отличие *Z*-датчика от остальных состоит в том, что на его плоскости укреплен зеркальный призма для изменения направления луча на 90°.

К внешней части датчика крепится шина, по которой может передвигаться каретка с магнитом. Этим магнитом производит-

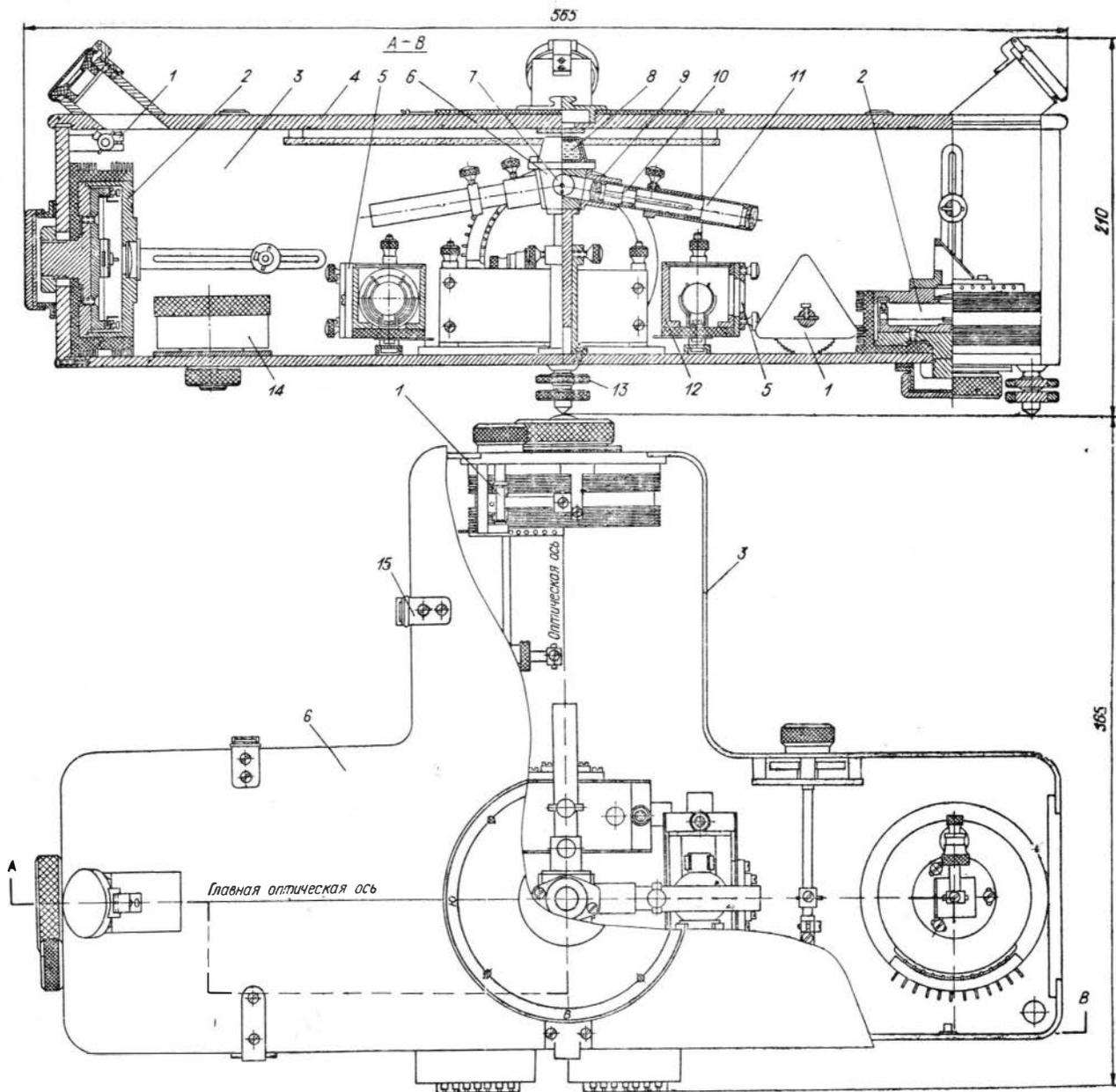


Рис. 30. Конструкция блока магнитных датчиков,

ся грубая компенсация магнитного поля, в основном при переезде в новый район измерения. Рядом с каждым датчиком находится устройство для плавной компенсации магнитного поля 1. Магнитное поле изменяется здесь с помощью магнита, вращаемого червячной парой. Ручки механизмов плавной магнитной компенсации выведены наружу. Диапазон грубой магнитной компенсации — до $\pm 2000-4000$ *гаусс*, плавной — до ± 400 *гаусс*.

Датчики охвачены кольцевыми каркасами типа колец Гельмгольца, на цилиндрической поверхности которых вырезаны пазы для обмоток (назначение обмоток дано в описании электрической схемы). Кольцевые каркасы имеют жесткое крепление к стенкам корпуса, их внутренние полости являются посадочными местами для датчиков. Размеры внутренней полости кольцевого каркаса совпадают с размерами домика датчика с точностью до скользящей посадки.

Центральное место в корпусе занимает трехколлиматорный светильник 6 — основной узел оптической системы. Осветитель установлен на колонке, которая жестко крепится к основанию корпуса. При юстировке осветитель может поворачиваться вокруг оси колонки и перемещаться по колонке по вертикали. Фиксация осветителя производится стопорными винтами. Оси трех оптических систем (коллиматоров) осветителя развернуты веерообразно. Место пересечения осей образует «оптический центр» блока магнитных датчиков. С оптическим центром совмещается нить накала электрической лампы 7. Из светового потока лампы коллиматорами вырезаются три световых пучка. Величина светового потока, падающего в коллиматор, определяется апертурным углом, который составляет для данных коллиматоров от 30 до 45° . В коллиматорах световые потоки формируются в узкие пучки, которые падают на зеркала магнитных систем датчиков 8, отражаясь от них, идут к фотокатодам соответствующих фотоумножителей. Каждый коллиматор представляет собой проекционную систему, состоящую из конденсора 9, щелевой диафрагмы 10 и объектива 11. Оправы конденсора и объектива имеют вид трубок и образуют телескопическую систему, которая может раздвигаться и поворачиваться вокруг оси. Внутри конденсорной трубки крепится цилиндр с прямоугольным отверстием, которое служит щелевой диафрагмой. Фиксация всех элементов коллиматора между собой, а также относительно корпуса осветителя осуществляется с помощью стопорных винтов. Коллиматор позволяет получить в плоскости диафрагмы фотоумножителя четкое изображение светящейся щелевой диафрагмы, увеличенное примерно в 8 раз (4×30 *мм*). Линия, проходящая через центры *H*- и *Z*-датчиков и через оптический центр

(в плане), образует главную оптическую ось блока магнитных датчиков; другая оптическая ось идет через оптический центр и центр D -датчика и перпендикулярна главной оптической оси. Следовательно, ход лучей трехколлиматорного осветителя совпадает в плане с оптическими осями прибора. Главная оптическая ось обычно гравировается на внешней поверхности крышки блока магнитных датчиков и служит для ориентирования прибора в направлении магнитного меридиана.

На корпусе осветителя закреплен круглый уровень 8.

Фотоумножители ФЭУ-2 помещены в светонепроницаемые кожухи 12 и удерживаются в них с помощью пружинных захватов, которые осуществляют одновременно электрический контакт с электродами фотоумножителей. Пружинные контакты закреплены на изолирующей плате из винипласта, которая является основанием кожуха. Сверху кожухи закрываются крышками, которые обеспечивают свободный доступ к фотоумножителям. Кожухи укреплены на вертикальных стойках и могут перемещаться по ним вверх или вниз во время оптической юстировки прибора. Для этой же цели предусмотрена также возможность перемещения кожуха по горизонтали. Фиксация положения кожуха осуществляется двумя фасонными гайками. Со стороны датчиков в кожухах имеются отверстия, которые перекрыты специальными диафрагмами 5. Роль этих диафрагм сводится к тому, чтобы осуществлять линейное фотоэлектрическое преобразование. Отверстие диафрагмы имеет прямоугольную форму, причем размер отверстия по вертикали может регулироваться подвижными гранями диафрагмы в пределах от 5 до 15 мм.

Движение световых индексов, отраженных от датчиков, происходит по горизонтали, поэтому от качества горизонтальных граней существенно зависит линейность фотопреобразователя. При изготовлении диафрагм особое внимание обращается на параллельность горизонтальных граней и частоту их обработки. Прямоугольное отверстие диафрагмы ограничивает световой индекс по высоте, причем вырезается всегда наиболее однородная часть индекса.

Электрическая часть блока магнитных датчиков монтируется на плате, которая крепится к крышке корпуса с внутренней стороны. Электронные лампы укреплены на этой плате с помощью пружинных держателей. Монтажная плата выполнена из винипласта и практически не дает утечек в условиях высокой влажности. В целом тот комплекс мероприятий, который применен в блоке магнитных датчиков, а именно надежность герметизации корпуса, применение осушителей и влагоотталкивающих изоляторов, достаточно надежно защищает электричес-

кую схему в самых неблагоприятных метеорологических условиях. Безусловно, степень защищенности электрической схемы от неблагоприятных факторов не всегда будет одинаковой и зависит от характера эксплуатации прибора и прежде всего от частоты и времени пребывания его в разгерметизированном состоянии. Поэтому с целью быстрого устранения возможных неисправностей в блоке магнитных датчиков все детали и узлы имеют свободный доступ, особенно заменяемые элементы. Даже самая сложная разборка и сборка, какая может встречаться в этом блоке, не требует, как правило, применения вспомогательных инструментов (отверток, ключей и т. п.).

Пульт управления и контроля

Пульт управления показан на рис. 31 со стороны лицевой панели и со стороны монтажа.

Весь электрический монтаж выполнен на металлической плате размером 48×35 см². Монтажная плата (она же представляет переднюю панель пульта управления) вставляется в защитный корпус и крепится к нему четырьмя винтами.

Со стороны монтажа на передней панели крепятся следующие детали: 13 переключателей галетного типа, 1 переключатель телефонного типа, 9 переменных проволочных сопротивлений, 4 тумблера. Ручки указанных деталей выведены на лицевую сторону панели. К передней панели крепятся также стрелочный индикатор (М-24) и 4 разъема типа РША-14.

На вертикальных стойках укреплены электронные лампы, 6 конденсаторов МБГО фильтра КПК, три конденсатора ЭГЦ для согласования гальванометров и два реле типа РП-5 для отметчика времени. Специальные вертикальные платы служат для крепления восьми (один запасной) гальванических элементов типа «Сатурн». Монтаж остальных радиодеталей выполнен на вертикальных платах.

На лицевой стороне монтажной панели расположены ручки, необходимые для дистанционного управления и контроля.

В каждом магнитном канале имеются следующие ручки:

а) ручка включения и выключения фильтра короткопериодических колебаний «Фильтры КПК»;

б) ручка переключателя чувствительности на пять положений «Чувствительность»; переключение слева направо соответствует возрастанию чувствительности магнитного канала;

в) ручка компенсации постоянной составляющей сигнала «Компенсация грубо»;

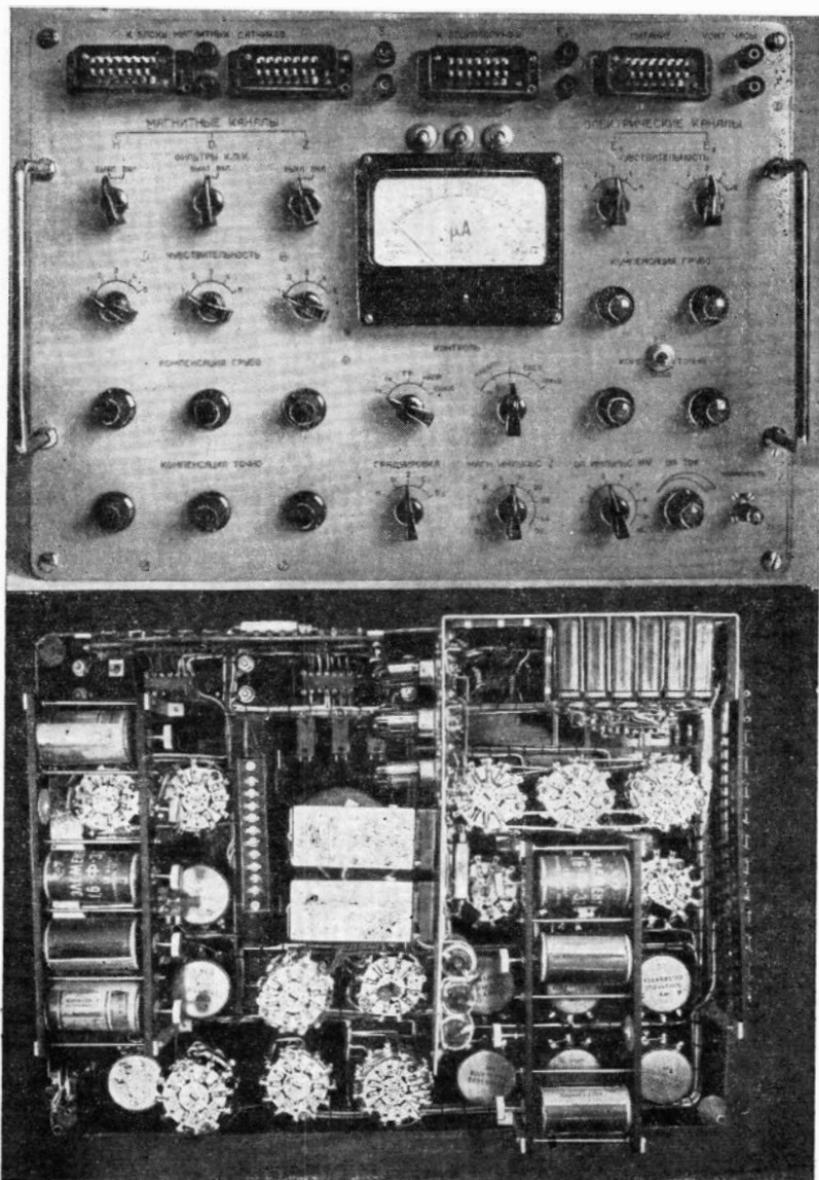


Рис. 31. Пульт управления и контроля станции ГГ42-1.
 а — внешний вид, б — вид со стороны монтажа.

г) ручка «Компенсация точно».

В каждом электрическом канале имеется:

а) переключатель чувствительности на пять положений «Чувствительность»; переключение слева направо соответствует увеличению чувствительности E -канала;

б) ручки компенсаторов постоянной э.д.с. «Компенсация грубо» и «Компенсация точно».

Для переключателя «Контроль» на пять положений каждый позволяют подключать стрелочный индикатор к следующим цепям: в анодные цепи J_1 , J_2 и J_3 для контроля режима работы магнитных каналов; в цепь компенсации постоянного выходного напряжения в каждом магнитном канале; в цепь опорного градуировочного тока; к пяти основным источникам питания для контроля напряжений B_H , B_D , B_Z , B_C и B_A .

Градуировочное устройство имеет следующие ручки:

1) переключатель «Градуировка» служит для поочередного подключения к градуировочному устройству одного из пяти измерительных каналов: H , D , Z , E_1 и E_2 ;

2) переключатель «Магнитный импульс γ » позволяет выбрать величину градуировочного импульса для магнитных каналов (10 значений в пределах от 0,25 до 50 *гамм*);

3) переключатель «Электрический импульс mV » позволяет выбрать величину напряжения для градуирования электрических каналов (10 значений в пределах от 1 до 10 *мв*);

4) ручка «Опорный ток» устанавливает величину опорного тока в градуировочном контуре;

5) переключатель «Полярность» позволяет включать и выключать градуировочный импульс, а также изменять его полярность.

На лицевой панели пульта управления расположены также:

а) четыре разъема, два из которых («К блоку магнитных датчиков») служат для дистанционного соединения при помощи кабеля блока магнитных датчиков, третий («К осциллографу») — для подключения гальванометрического осциллографа, четвертый («Питание») — для подключения источников питания;

б) четыре пары клемм, из которых E_1 и E_2 служат для подключения проводов, идущих от электродов, клеммы «контактные часы» — для подключения контактных часов и одна пара клемм — для вспомогательных целей: настройки и эталонирования прибора;

в) четыре тумблера для включения: осветителя «свет», напряжения фотоумножителей «ФЭУ», шунта для индикатора «шунт» и источников питания компенсаторов в E -каналах «КП».

Гальванометрический осциллограф

Для микровариационной станции может быть применен любой осциллограф, удовлетворяющий следующим требованиям: число гальванометров — не менее 5; постоянная гальванометра по току — не более 10^{-7} а/мм/м; оптический рычаг не менее 50 см; скорость движения фотобумаги от 1 до 100 мм/мин; ширина фотобумаги — не менее 20 см.

Весьма важным эксплуатационным параметром является потребляемая электрическая мощность осциллографа. Поэтому выбор тех или иных осциллографов зависит от характера исследований. Для стационарных исследований экономичность прибора не имеет принципиального значения. Для исследований, проводимых в труднодоступных районах, неоспоримыми преимуществами обладают осциллографы серии ЭПО (электроразведочные полевые осциллографы), из которых осциллографы типа ЭПО-8 являются, пожалуй, наиболее удобными. Универсальность этих осциллографов достигается применением в них сменных лентопротяжных механизмов различных типов. Так, для осциллографов ЭПО-8 разработаны три типа привода лентопротяжного механизма: пружинный привод, часовой привод и электрический привод, которые выполнены в виде отдельных приставок. В зависимости от поставленной задачи может быть выбран любой тип регистрации. В микровариационной станции ГГ42-1 использовался осциллограф ЭПО-8 с несколько измененной схемой. Приведем лишь основные его характеристики.

Характеристика ЭПО-8

Количество гальванометров	6 шт.
Постоянная гальванометра по току c_1	$10^{-8} \frac{a}{\text{мм/м}}$
Частота собственных колебаний без шунтирующего конденсатора	18—20 гц.
Длина оптического рычага	430 мм
Ширина фотобумаги	200 мм
Пружинный лентопротяжный механизм с приставкой кассетного типа:	
скорость движения фотобумаги	0,5—4,5 мм/сек.
емкость приемной кассеты	15 м
время работы механизма без подзавода	15 мин
потребляемая электрическая мощность осциллографа	0,6 вт
Часовой лентопротяжный механизм с приставкой барабанного типа:	
диапазон скоростей движения фотобумаги	$4,8 \div 16,5 \div 33$ см/час.
емкость барабана	0,66 м
время работы часового механизма без подзавода	36 час
потребляемая электрическая мощность осциллографа	0,6 вт

Электрический привод с приставкой кассетного типа:

диапазон скоростей лентопротяжного механизма при номинальном напряжении электродвигателя (12 в) — 0,25—0,64—1,6—4—10—25 мм/сек;

емкости приемной кассеты 15 м

общая потребляемая мощность 5 вт

Тип лампы осветителя — СЦ-79

Габариты — 380×250×315 мм³

Вес — 20 кг

Блок питания, эталонировочное и другие вспомогательные устройства

Источники питания размещены в отдельном ящике. Сюда входят пять малогабаритных щелочных аккумуляторов типа 2НКН24, три из которых используются для отдельного питания ламп Л₁, Л₂, Л₃ и два, соединенные параллельно, — для питания осветителя. Аккумуляторы разделены между собой изолирующими прокладками во избежание гальванической связи между ними. В этом же ящике находится сухая батарея для питания фотоумножителей. Анодные батареи не имеют футляра.

Эталонировочное устройство включает следующие элементы: эталонировочные кольца Гельмгольца, установочную раму, миллиампервольтметр типа М-82 класса 0,5 и два магазина сопротивлений класса 0,1.

Кольца Гельмгольца служат для создания магнитного поля с высокой точностью. Кольца имеют по одному витку, постоянная которых $g = 3,8 \frac{\text{га.мм.а}}{\text{ма}} \pm 0,2\%$. Во время эталонировки центр колец совмещается приблизительно с центром эталонируемого датчика. На рис. 32 такое совмещение показано для *H*- и *D*-датчиков. Для более удобного совмещения применяется установочная рама.

В комплект станции входят также соединительные кабели, провода для электроизмерительных линий типа ПВР (1000 м).

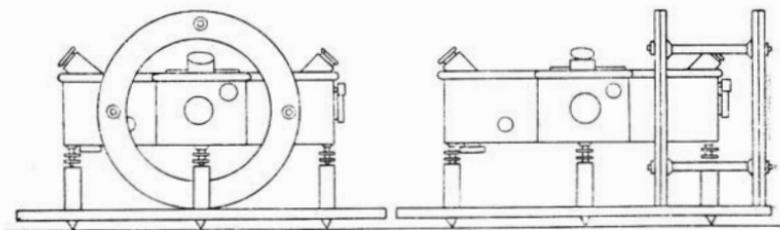


Рис. 32. Установка блока магнитных датчиков станции ГГ42-1 в кольцах Гельмгольца при эталонировке.

со смоточными катушками, свинцовые электроды, буссоль типа БС-2, контактные часы типа МХ-6 (морской хронометр с мпнутым контактом), свинцовые опоры для блока магнитных датчиков и различные запасные детали.

Микровариационная станция ГГ42-2. Электрическая схема

Микровариационная станция ГГ42-2 представляет усовершенствованный вариант станции ГГ42-1. Конструкция механической части ГГ42-1 оставлена в основном без изменений, но существенно переработана электрическая часть станции. Изменения преследовали следующие цели: повышение надежности электрической схемы и особенно цепей коммутации; упрощение электрической схемы и особенно схемы контроля и системы питания; дальнейшее повышение стабильности схемы при регистрации длиннопериодных вариаций; улучшение схемы фильтрации короткопериодических колебаний и другие.

Электрическая схема микровариационной станции ГГ42-2 представлена на рис. 33. Рассмотрим ее отдельные части.

Блок магнитных датчиков содержит основную часть схемы трех магнитных измерительных каналов. Поскольку принципиально работа каждого канала ничем не отличается, рассмотрим назначение элементов электрической схемы блока магнитных датчиков на примере H -канала. Напряжение, пропорциональное вариации магнитного поля, снимается с анода лампы L_1 (2П2П). Нагрузкой усилителя постоянного тока, собранного на этой лампе, служат сопротивления R_1 и R_4 . Накальное напряжение на лампу L_1 подается от общего источника B_H (2,5 в); анодное напряжение — от источника B_a (аккумуляторной батареи на 42 в). Магнитный датчик симметрично охвачен пятью обмотками $Гр$, $ОС$, $КН$, $КА$ и $З$, предназначенными для градуировки, управления и стабилизации магнитного канала.

Обмоткой $Гр$ осуществляется градуирование магнитного канала и плавная компенсация магнитного поля (дистанционное управление датчиком).

Обмотка $З$ и конденсатор C_1 осуществляют необходимый режим демпфирования магнитного датчика.

Обмотка $ОС$ и сопротивления R_4 , R_{10} , R_{13} образуют цепь обратной отрицательной связи по магнитному полю. При этом включением или выключением сопротивления R_{10} обеспечивается два значения обратной отрицательной связи: $\beta_2 = 8 \text{ э/а}$ и $\beta_1 = 2 \text{ э/а}$. Более глубокая отрицательная связь ($\beta_2 = 8 \text{ э/а}$) при-

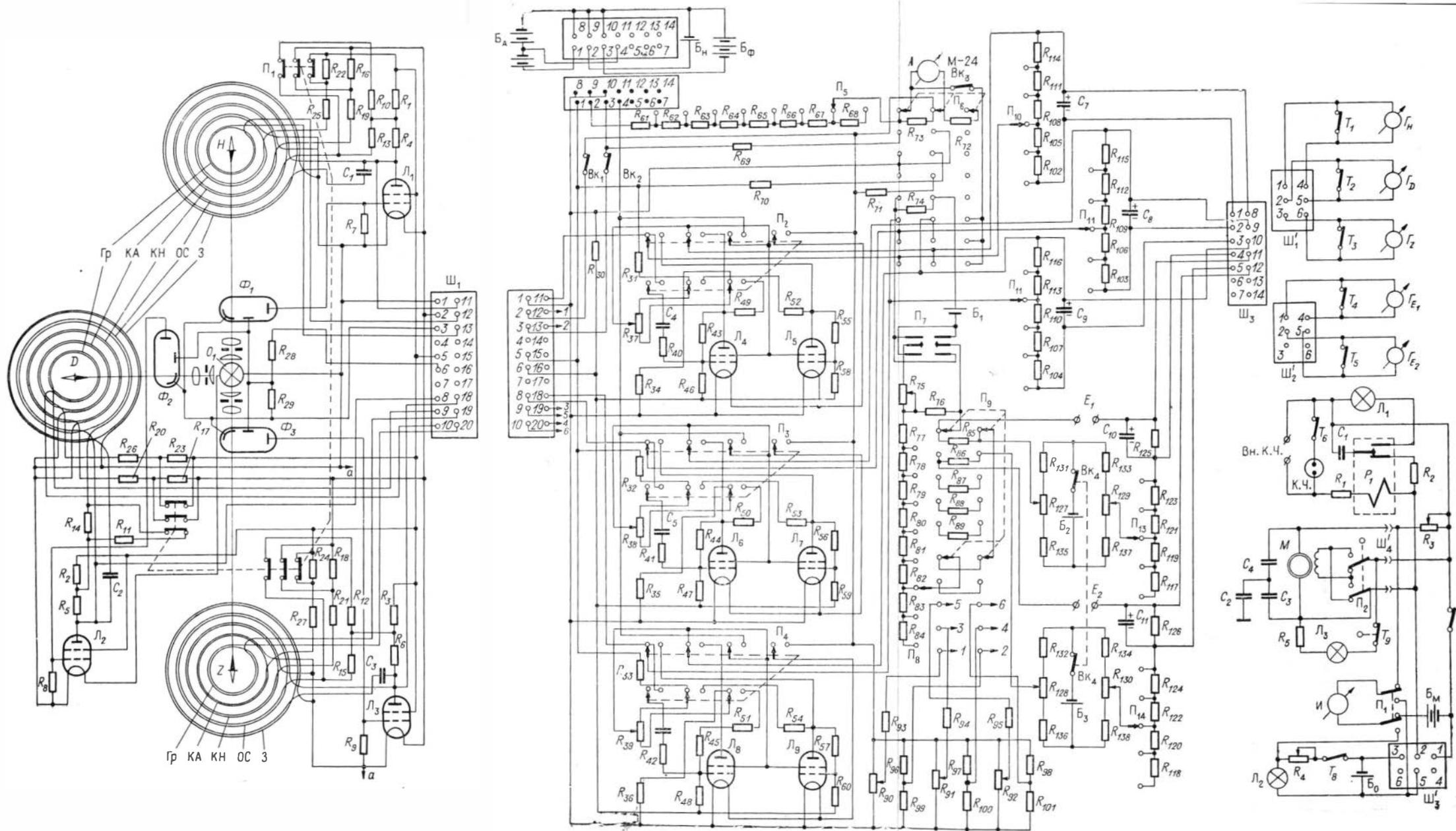


Рис. 33. Электрическая схема станции ГГ42-2.

меняется при измерении процессов, требующих высокой стабильности пульс-пункта прибора, но для которых некоторая потеря чувствительности не имеет существенного значения.

Обмотка KH и сопротивления R_{16} и R_{19} — цепь автокомпенсации дрейфа напряжения накального источника (B_n). Короткое замыкание сопротивления R_{16} соответствует обратной связи β_2 , в разомкнутом состоянии — β_1 . Обмотка KA и сопротивления R_{22} и R_{25} — цепь автокомпенсации дрейфа анодного напряжения.

Замыкание или размыкание сопротивления R_{22} соответствует двум значениям обратной отрицательной связи β_2 и β_1 .

Включение и выключение указанных выше сопротивлений (R_{10} , R_{16} , R_{22}), а также аналогичных сопротивлений в других магнитных каналах производится с помощью переключателя Π_1 , роль которого выполняет разъем типа РША-20 или РША-14.

К фотоумножителям ФЭУ-2 питание подводится от источника $B_\Phi = 220$ в через делитель R_{28} , R_{29} , R_{30} . Связь блока магнитных датчиков с остальной схемой осуществляется кабелем (30 м) через разъем Ш₁.

Пульт управления и контроля. Продолжим рассмотренные схемы H -накала. Сигнал с анода лампы Λ_1 через коммутирующий переключатель Π_2 и регулятор чувствительности $R_{102} - R_{114}$ (Π_{13}) и далее через разъем Ш₃ подается на регистрирующий гальванометр Γ_{11} . Гальванометр Γ_H вместе с регулятором чувствительности Π_{10} включен в диагональ моста, левая ветвь которого образована сопротивлениями R_1 , R_4 и внутренним сопротивлением лампы Λ_1 , правая ветвь — сопротивлениями R_{31} , R_{37} (потенциометр) и R_{34} . К другой диагонали мостовой схемы приложено анодное напряжение от батарей B_a . Компенсация постоянной составляющей сигнала, поступающего с анода Λ_1 , производится с помощью потенциометра R_{37} (грубо). Более плавная компенсация в магнитном канале H осуществляется с помощью потенциометра R_{90} , представляющего одну из ветвей мостовой ячейки (R_{90} , R_{96} , R_{99}). Питание для данной и других подобных ячеек поступает от накальной батареи B_n . В диагональ мостовой ячейки включена градуировочная обмотка датчика (Γ_p , точки 1, 2), которая является одновременно компенсирующей обмоткой. Сопротивление R_{93} ограничивает верхний предел плавной компенсации, величина которого не превышает 15—20 *гмм*.

В пульте управления расположены фильтрующие ячейки магнитных каналов. Схемы фильтров для всех каналов одинаковы. Для канала H фильтр короткопериодических колебаний

(КПК) включает следующие элементы. Конденсатор C_4 и сопротивления R_{40} , R_{46} образуют однозвенный Γ -образный фильтр верхних частот. Усилителем сигналов, поступающих с выхода фильтра, служит каскад, собранный на двух лампах Λ_4 и Λ_5 (2П2П), по схеме параллельного баланса. Балансировка анодных токов осуществляется с помощью потенциометра R_{37} , включаемого между сопротивлениями R_{49} и R_{52} . Между анодами обеих ламп включается гальванометр Γ_H вместе с регулятором чувствительности Π_{10} . Усилитель охвачен глубокой отрицательной связью по напряжению. Элементами обратной связи являются сопротивления R_{43} , R_{46} для лампы Λ_4 и R_{55} , R_{58} — для лампы Λ_5 . Отрицательное смещение на сетки ламп подается от источника B_Φ через делитель R_{28} , R_{29} , R_{30} . Накали лампы усилителя питаются от общего источника накала B_H , анодное напряжение 26 в подается от батареи B_A с помощью дополнительного отвода.

Включение фильтра кпк и усилителя в разрыв между основной измерительной схемой магнитного канала и регистрирующим гальванометром производится переключателем Π_2 . Во время включения Π_2 происходит коммутация следующих цепей: при включении фильтра кпк анод лампы Λ_1 соединяется с конденсатором фильтра; потенциометр R_{37} из схемы моста переключается к сопротивлениям R_{46} и R_{52} , выполняющим роль анодных нагрузок ламп Λ_4 и Λ_5 ; регистрирующий гальванометр Γ_H отключается от диагонали моста и подключается к анодам ламп Λ_4 , Λ_5 (в диагональ другой мостовой схемы); подается напряжение питания на усилительный каскад. При включенных фильтрах используется только компенсация «грубо» (потенциометр R_{37}).

Схема для регистрации земных токов состоит из следующих элементов (на примере канала E_1):

а. Компенсатор постоянной э.д.с. представляет мостовую схему из сопротивлений R_{127} , R_{129} , R_{131} , R_{133} , R_{135} и R_{137} , из которых R_{137} — потенциометр грубой компенсации, R_{129} — точной. Компенсатор питается от гальванического элемента B_2 .

б. Градуировочное сопротивление R_{85} . Величина градуировочного импульса, подаваемого в цепь измерения регулируется величиной тока, протекающего через сопротивление R_{85} .

в. Цепь балластных сопротивлений R_{117} — R_{123} , которая позволяет изменять сопротивление измерительной цепи, а одновременно служит регулятором чувствительности E -канала. Вместо того, чтобы загружать гальванометр, как это делается в магнитном канале, в измерительную цепь теллурического канала вводится дополнительное сопротивление. Возрастание

входного сопротивления измерительной цепи по сравнению с сопротивлением заземления способствует повышению стабильности E -канала.

г. Регистрирующий гальванометр зашунтирован постоянным сопротивлением R_{125} (критическим) и согласующим конденсатором C_{10} .

д. Клеммы E_1 служат для подключения проводов от заземленных электродов.

Регуляторы чувствительности у гальванометров Γ_H, Γ_D и Γ_Z не отличаются от подобных регуляторов в схеме ГГ42-1.

Градуировочное устройство является общим для всех пяти каналов и включает следующие элементы:

а. Цепь опорного градуировочного тока: батарея B_1 , сопротивления R_{74}, R_{75} и R_{76} . Сопротивление R_{74} является шунтом стрелочного индикатора, сопротивление R_{75} — регулятором величины опорного тока.

б. Цепь градуировочного тока для магнитных и электрических каналов: $R_{76}, R_{77}-R_{84}$, одна из градуировочных обмоток Γp (точки 1—2, 3—4, 5—5), одно из сопротивлений $R_{85}-R_{89}$. Регулировка тока в этой цепи осуществляется переключателем Π_8 (восемь фиксированных значений тока). Эта же цепь служит для градуирования электрических каналов. Сопротивления R_{85} и R_{86} включены соответственно в цепь E_1 и E_2 -каналов. Величина напряжения на сопротивлениях R_{85}, R_{86} определяется током в градуировочной цепи и устанавливается также переключателем Π_8 . Изменение адреса градуировки производится переключателем Π_9 .

В цепи опорного градуировочного тока имеется переключатель Π_7 , с помощью которого осуществляется включение тока и изменение его полярности.

Схема контроля в станции ГГ42-2 состоит из одного переключателя Π_6 на восемь положений и стрелочного индикатора М-24 (100—0—100 ма). Стрелочный индикатор может быть подключен к следующим цепям:

а. В диагональ мостовой схемы магнитного канала параллельно регистрирующему гальванометру (первое, второе и третье положения переключателя Π_6 снизу вверх). В этих положениях с помощью стрелочного индикатора контролируется и компенсируется постоянная составляющая сигнала с целью предупреждения зашкаливания регистрирующего гальванометра. Для предупреждения зашкаливания самого стрелочного индикатора имеется дополнительный шунт R_{75} .

б. В цепь опорного градуировочного тока (четвертое положение Π_6).

в. К источникам питающих напряжений: 5-е положение — контроль накального напряжения, 6-е положение — контроль анодного напряжения, 7-е положение — контроль напряжения фотомножителей.

г. В цепь тока накала для контроля суммарного тока, потребляемого всей схемой (8-е положение P_6). В цепь тока накала включен ступенчатый реостат, который предназначен для регулировки напряжения накала, а также для проверки системы автокомпенсации по источнику накала.

На пульте управления имеются следующие тумблеры: B_{K1} — для включения осветительной лампы, B_{K2} — для подачи напряжения на ФЭУ-2, B_{K3} — для включения дополнительного шунта к индикатору М-24, B_{K4} — для включения гальванических элементов B_2 и B_3 в схемы компенсаторов постоянной э.д.с. электрических измерительных каналов.

Гальванометрический осциллограф. В станции ГГ42-2 применяется осциллограф ЭПО-9 с несколько измененной электрической схемой. Для связи пульта управления и осциллографа служат разъемы Ш₃ (на пульте управления) и Ш₁, Ш₂ (на передней панели осциллографа). Гальванометры для всех измерительных каналов одинаковы и обозначены в соответствии с теми измерительными каналами, с которыми они работают: $G_H, G_D, G_Z, G_{E1}, G_E$. Каждый гальванометр в нерабочем состоянии шунтируется накоротко тумблерами $T_1—T_5$.

Цепь питания электродвигателя M состоит из источника напряжения 6—12 в, выключателя T_7 и реостата R_3 . Цепь питания осветителя L_2 состоит из источника напряжения 2,5 в, выключателя T_8 и реостата R_4 .

С помощью индикатора «И» и переключателя P_1 осуществляется контроль напряжений в цепи электродвигателя и осветителя. Лампочка L_3 является индикатором движения фотобумаги. Набор конденсаторов $C_2—C_4$ является заградительным фильтром. Питание к осциллографу подается через разъем Ш'3.

В осциллографе смонтирован отметчик времени. Он включает в себя: реле P_1 , сопротивления R_1, R_2 , емкость C_1 , лампочку L_1 и контактные часы КЧ. При замыкании контактных часов лампочка L_1 дает вспышку длительностью 0,1—0,2 сек и засвечивает на фотобумаге осциллографа тонкий штрих. На лицевой панели осциллографа выведены клеммы для присоединения внешних контактных часов. Отключение внутренних часов производится тумблером T_6 . Питание для отметчика времени подается от аккумулятора электродвигателя.

С х е м а п и т а н и я. Комплект источников питания для станции ГГ42-2 включает один или несколько аккумуляторов типа

2НКН24, соединенных параллельно для питания накальных цепей напряжением 2,5 в; анодную батарею, составленную из аккумуляторов типа 32АН-2,25 общим напряжением 42 в и батарее типа ПМГЦ-225 для питания фотоумножителей. Питание подводится к схеме станции 5-жильным кабелем через разъем Ш2. В пульте управления имеются три элемента типа «Сатурн».

Осциллограф питается от отдельного источника напряжением 6—12 в и емкостью не менее 70 а-ч. По сравнению со схемой ГГ42-1 в данной схеме количество источников питания значительно уменьшено. Ниже приведены характеристики гальванических батарей, применяемых в схеме станции ГГ42-2 (табл. 5).

Схема эталонировочного устройства показана на рис. 34 и предназначена для эталонирования (градуирования

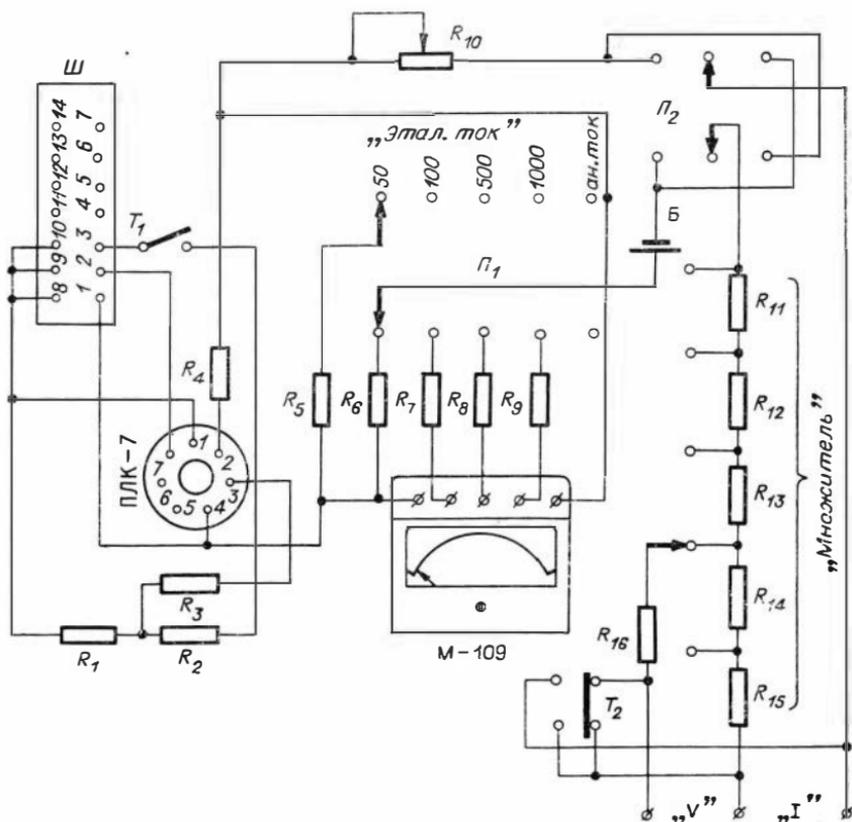


Рис. 34. Электрическая схема эталонировочного устройства.

Таблица 5

Обозначение по схеме	Тип источника	Номинальное напряжение, в	Номинальная емкость, а-ч	Для питания	Диапазон допустимых напряжений, в	Потребляемый ток, а	Продолжительность работы в часах	Примечание
Бн	2НКН24	2,5	24	осветительной лампы; пакалов ламп Л ₁ —Л ₉ ; компенсаторов магнитных каналов «точно»	2,5—2,3	0,38—0,58	50—70	два аккумулятора соединены параллельно
Бн	32АКН2,25	42	2,25	анодных цепей усилительных ламп Л ₁ —Л ₉	42—38	0,006—0,012	200—100	без фильтров с фильтрами
БФ	ПМЦГ225	220	0,1	фотоумножителей ФЭУ-2	220—200	10 ⁻⁴	до конца срока годности	
Б ₁	„Сатурн“ „Марс“	1,6	—	градупровочного устройства	1,6—1,2	—	„	
Б ₂ Б ₃	„Сатурн“ „Марс“	1,6	—	компенсаторов Е-канала	1,6—1,3	0,005	50—100	
БМ	ЖН-100	6	100	мотора осциллографа	5—6	1,0	60	
БС	2НКН24	2,5	24	осветителя осциллографа	2,5—2,2	0,25	60	

ния) измерительных магнитных и электрических каналов, т. е. периодической поверки градуировочного устройства микровакциационной станции, параметры которого со временем могут изменяться. В схеме эталонировочного устройства используется четырехпредельный микроамперметр типа М109 на 50, 100, 500, и 1000 *мкА*. Переключение пределов измерения производится переключателем Π_1 . В цепь эталонировочного тока последовательно включены: элемент типа «Сатурн», индикатор М109, сопротивление R_{10} , клеммы I (к которым подключается обмотка эталонировочного кольца), сопротивления $R_{11}—R_{15}$. Величина тока в этом контуре регулируется переменным сопротивлением R_{10} . Постоянная обмотки эталонировочного кольца рассчитана таким образом, что при прохождении через обмотку тока полного отклонения индикатора, т. е. 50, 100, 500 или 1000 *мкА* в центре датчика, к которому крепится эталонировочное кольцо, будет создано поле соответственно 1, 2, 10 или 20 *гаусс* с погрешностью не более 0,5%. Другие значения магнитного поля могут быть получены из пропорциональных величин тока, отсчитываемых по шкале М109, однако погрешность при этом будет больше, чем при токах полного отклонения.

Эталонировочные значения напряжений для электрических каналов снимаются с цепочки сопротивлений $R_{11}—R_{15}$ (2×5 *ом*). Эталонируемый электрический канал подключается к клеммам U , тумблер T_2 при этом переключается по схеме влево. Переключателем Π_3 выбирается величина сопротивления в омах — от 2 до 10 *ом*. Величина тока полного отклонения устанавливается реостатом R_{10} по выбранной предварительно шкале М109. Величина эталонировочного напряжения равна произведению тока на величину выбранного сопротивления. Всего на клеммах U можно получить 16 значений напряжений от 0,1 до 10 *мВ* с погрешностью не более 0,5%.

В пятом положении Π_1 («анодный ток») производится испытание ламп 2П2П, применяемых в станции ГГ42-2. К испытательной панельке, куда вставляется проверяемая лампа, подведены напряжения, соответствующие усилительным каскадам на лампах L_1 , L_2 и L_3 . Выключателем T_1 подается отрицательное смещение на испытываемую лампу. К разъему Π_1 подключается тот же кабель, которым подается питание к станции (к разъему Π_2). Шкала индикатора М109 при измерении анодного тока лампы рассчитана на 5 *мА*.

Основные электрические параметры схемы ГГ42-2. Приведем номинальные значения электрических параметров схемы ГГ42-2 и допустимые пределы их изменения при номинальном режиме питания (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Электрические параметры схемы ГГ42-2	Номинальное значение и пределы допустимых отклонений
Ток фотоумножителя при полном наведении светового пиндекса в отверстие диафрагмы	0,5 мкА
Анодный ток ламп Л ₁ , Л ₂ и Л ₃ при нулевом потенциале управляющей сетки (напряжение на фотоумножителях и осветителе отключено)	$I_{a\max} = 3,5 \text{ мА} \pm 5\%$
Анодный ток в лампах Л ₁ , Л ₂ и Л ₃ при полностью наведенных световых пиндексах (фотоумножитель включен)	$I_a = 0$
Номинальный рабочий ток ламп Л ₁ , Л ₂ и Л ₃ и пределы его изменения в процессе измерений	$I_{a0} = 2 \pm 0,8 \text{ мА}$
Анодный ток ламп Л ₄ —Л ₉ при нулевом потенциале на управляющей сетке	$I_{a\max} = 1,4 \text{ мА} \pm 5\%$
Номинальный рабочий анодный ток в лампах Л ₄ —Л ₉	$I_{a0} = 1,0 \text{ мА} \pm 5\%$
Опорный градуировочный ток	$I_{Гр} = 10 \text{ мА} \pm 1\%$
Параметр обратной связи $1 + c\beta$ а. Первое значение	40
б. Второе значение	10
Значение шкалы индикатора М-24 при полном отклонении стрелки (на 100 делений) а. При измерении тока в цепи компенсации магнитных каналов (шунт R_{72} включен)	$2 \text{ мА} \pm 5\%$
То же (шунт R_{72} выключен)	$100 \text{ мА} \pm 1\%$
б. При измерении опорного градуировочного тока	$10 \text{ мА} \pm 1\%$
в. При измерении напряжения накала	$5 \text{ в} \pm 1\%$
г. При измерении анодного напряжения	$50 \text{ в} \pm 1\%$
д. При измерении напряжения фотоумножителей	$500 \text{ в} \pm 1\%$

Конструкция станции

В микровариационной станции ГГ42-2 конструкция блока магнитных датчиков и самих датчиков ничем не отличается от конструкции тех же узлов станции ГГ42-1. Описание их дано выше (рис. 29 и 30).

В станции ГГ42-2 применяются магнитоэлектрические датчики на растяжках из бериллиевой бронзы.

Пульт управления и контроля. Конструкция этого блока во многом отличается от соответствующей конструкции в станции ГГ42-1. Весь электрический монтаж пульта управления ГГ42-2 выполнен на одном шасси. Непосредственно на металлической плате шасси, на лицевую сторону которой выведены ручки управления, крепятся следующие детали (со стороны монтажа): восемь переключателей типа ПР, четыре переключателя типа ПГК и один — типа телефонного ключа, одиннадцать переменных проволочных сопротивлений типа БТ, четыре тумблера, три разъема РША-20 и РША-14, три пары клемм и стрелочный индикатор.

На вертикальных стенках шасси размещены лампы (шесть ламп типа 2П2П) и остальные радиодетали. Элементы типа «Сатурн» крепятся в специальных футлярах. Шасси вставляется в защитный кожух и крепится к нему четырьмя винтами.

Рассмотрим лицевую панель пульта управления (рис. 35).

Магнитные каналы. Включение и выключение фильтров короткопериодических колебаний осуществляется ручками «Фильтры КПК» (переключатели $П_2, П_3, П_4$, ПГК-2П8Н). Регулировка чувствительности магнитных каналов производится ручками «Чувствительность» (переключатели $П_{10}, П_{11}, П_{12}$ типа ПР15—5). Имеется пять фиксированных значений чувствительности, переключение слева направо соответствует увеличению чувствительности. Чувствительность между двумя положениями отличается в два раза, между крайними положениями — в 32 раза. Ручками «Компенсация грубо» (переменные сопротивления R_{37}, R_{38}, R_{39} типа БТ, 5 *ком*) и «Компенсация точно» (сопротивления R_{90}, R_{91}, R_{92} типа БТ, 350 *ом*) производится компенсация постоянной составляющей электрического сигнала в магнитных каналах.

Электрические каналы. Ручками «Чувствительность» (переключатели $П_{13}, П_{14}$ типа ПР 15—5) изменяется чувствительность измерительных *E*-каналов. Повышение чувствительности соответствует переключению слева направо. Всего для этих ручек «Чувствительность» имеется пять фиксированных положений.

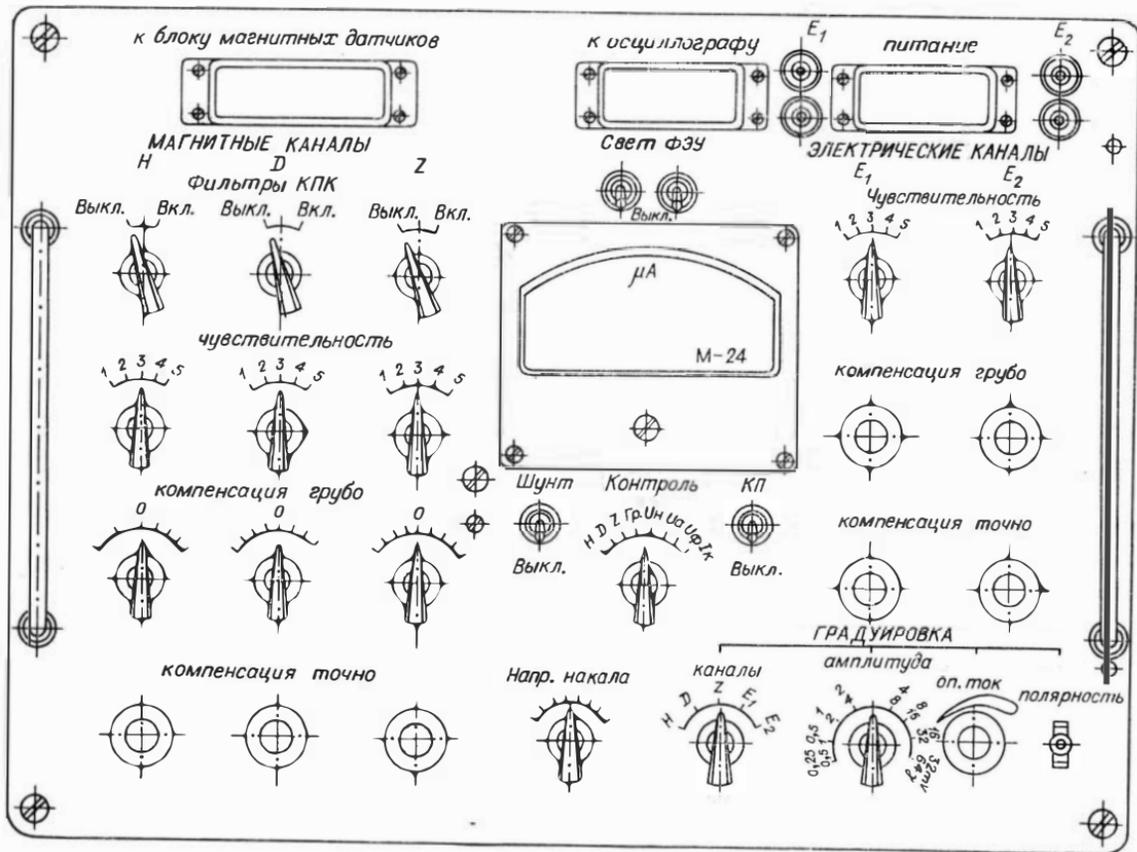


Рис. 35. Передняя панель нуля управления и контроля станции ГГ42-2.

Ручками «Компенсация грубо» (сопротивления R_{127} , R_{128} , типа БТ, 25 ом) и «Компенсация точно» (сопротивления R_{129} , R_{130} типа БТ, 5 ом) компенсируется э.д.с. поляризации на концах измерительных линий, идущих от заземленных электродов.

Контроль. На пульте имеется одна ручка «Контроль» на восемь положений (переключатель $П_6$, типа ПР15—8). Каждому положению соответствует следующая гравировка слева направо: H , D и Z — контроль тока в цепи компенсации H , D и Z -каналов; I_p — контроль опорного тока в градуировочном контуре; U_n — контроль напряжения накала; U_a — контроль анодного напряжения; U_ϕ — контроль напряжения фотоумножителей; I_n — контроль суммарного тока накала.

Градуировочное устройство. Сюда относятся следующие ручки. Ручкой «Каналы» градуировочный импульс посылается поочередно в один из пяти измерительных каналов. Соответственно имеется пять положений: H , D , Z , E_1 , E_2 . Ручкой «Амплитуда имп» выбирается величина градуировочного импульса для магнитных каналов в пределах от 0,5 до 64 гамм и для электрических — от 0,25 до 32 мв. Всего имеется восемь положений. Амплитуда градуировочного импульса в двух соседних положениях отличается в два раза, между крайними положениями — в 128 раз. Ручкой «Опорный ток» устанавливается ток в градуировочном контуре. Рычажком «Полярность» производится включение тока в цепь градуировочного контура. В вертикальном положении рычажка ток выключен, при наклоне рычажка вперед или назад ток включен. На лицевой панели пульта находится стрелочный индикатор М-24 со шкалой 100—0—100 мка. Клеммы E_1 и E_2 предназначены для подключения к ним проводов от заземленных электродов (замыкается цепь E -каналов). Разъемы «К блоку магнитных датчиков», «К осциллографу» и «Питание» предназначены для подключения к ним кабелей, идущих от соответствующих блоков. Тумблерами «Свет» и «ФЭУ» производится включение напряжения на осветитель и на фотоумножители. Тумблером «ШУНТ» производят включение дополнительного шунта к стрелочному индикатору или регистрирующему гальванометру в тех случаях, когда через них протекает большой некомпенсированный ток (постоянная составляющая сигнала). Тумблером «КП» включают элементы типа «Сатурн» в цепь компенсаторов E -каналов. Ручкой «Напр. накала» производится ступенчатая регулировка напряжения накала в небольших пределах. Этим переключателем можно проверять и производить регулировку системы автокомпенсации дрейфа нуля по источнику накала, не собирая дополнительную схему.

Гальванометрический осциллограф. В станции ГГ42-2 используется осциллограф типа ЭПО-9 с электрическим приводом лентопротяжного механизма. В случае необходимости в этом осциллографе может быть использована приставка с пружинным двигателем или часовым механизмом. Следовательно, ЭПО-9 ничем не отличается от ЭПО-8, краткая характеристика которого приведена выше (подробное описание см. в специальной инструкции [1]).

Блок питания состоит из двух ящиков. В одном ящике смонтирована батарея аккумуляторов типа З2АКН 2,25. Эта батарея используется для питания анодов усилительных ламп. В другом ящике размещены четыре аккумулятора типа 2НКН24, предназначенные для питания накаливающих цепей. Эти аккумуляторы включаются по одному или параллельно от двух до четырех штук в зависимости от характера эксплуатации станции. В этом же ящике помещается батарея типа ПМЦГ-225, АМЦГ-315 (или подобная им), предназначенная для питания фотоумножителей ФЭУ-2 и смещения на управляющие сетки ламп Л₄—Л₉.

Питание для осциллографа не имеет специальной упаковки. Эталонировочное устройство. Приспособление для

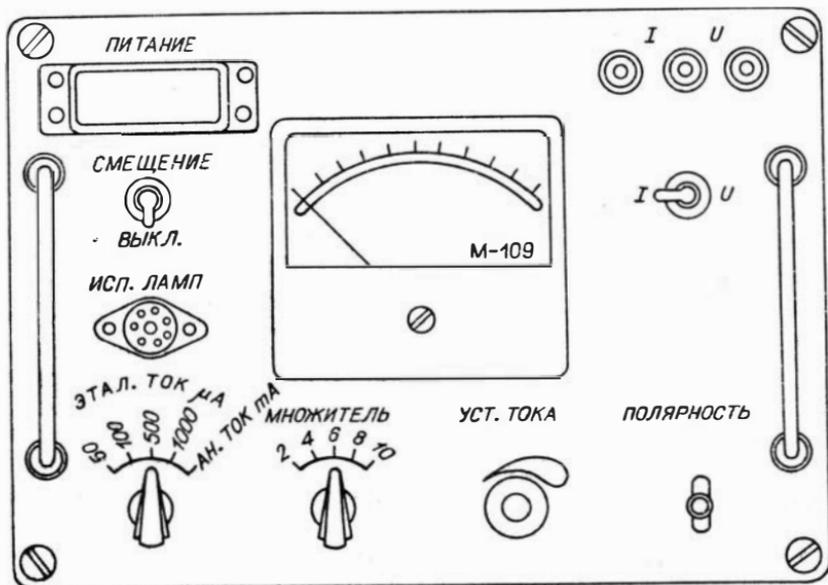


Рис. 36. Передняя панель эталонировочного устройства.

Сравнительная техническая характеристика станций ГГ42-1 и ГГ42-2

Наименование параметра, детали, узла	Станция ГГ42-1	Станция ГГ42-2
Магнитные каналы		
Пороговая чувствительность	$2-5 \cdot 10^{-8}$ э	$2-5 \cdot 10^{-8}$ э
Частотный диапазон в режиме регистрации суммарных вариаций (фильтр КПК выключен)	$1-10^{-4}$ гц	$4-10^{-5}$ гц
Частотный диапазон при включенном фильтре КПК	$1-10^{-2}$ гц	$4-10^{-2}$ гц
Чувствительность без обратной связи	50 мка/гамма	100 мка/гамма
Коэффициент обратной связи		
а) β_1	2 э/а	2 э/а
б) β_2	—	8 э/а
Чувствительность с обратной связью (β_1)	5 мка/гамма	4-6 мка/гамма
То же (β_2)	—	1-1,5 мка/гамма
Чувствительность регистрирующего гальванометра	$5 \cdot 10^7 \frac{\text{мм/м}}{а}$	$5 \cdot 10^7 \frac{\text{мм/м}}{а}$
Чувствительность магнитных каналов на шкале осциллографа (β_1)	$200-400 \frac{\text{мм}}{\text{гамма}}$	$400-800 \frac{\text{мм}}{\text{гамма}}$
То же (β_2)	—	$50-80 \frac{\text{мм}}{\text{гамма}}$
Тип датчиков	Кварцевая рамка	На металлических растяжках
Цена деления датчика	$0,3 \frac{\text{мм}}{\text{гамма}}$	$0,2-0,3 \frac{\text{мм/м}}{\text{гамма}}$
Частота собственных колебаний датчика	1,2 гц	2-3 гц
Частота собственных колебаний датчика с обратной связью (β_1)	1,5 гц	2,5-3,5 гц
То же (β_2)	—	3-4 гц

Наименование параметра, детали, узла	Станция ГГ42-1	Станция ГГ42-2
Температурный дрейф датчиков	Менее 1 <i>гам-ма/град</i>	Менее 1 <i>гам-ма/град</i>
Электрический дрейф нуля в магнитном канале (β_1)	Менее 2 <i>гам-ма/час</i>	Менее 1 <i>гамма/час</i>
То же (β_2)	—	Менее 0,4 <i>гам-ма/час</i>
Нелинейность магнитных каналов в диапазоне ± 50 γ	Не более 0,5 %	Не более 0,5 %
То же, в диапазоне ± 100 γ	Не более 1 %	Не более 1 %
Нелинейность по шкале осциллографа	Не более 2 %	Не более 2 %
Дрейф нуля-пункта при включенных фильтрах КПК	2 <i>гамма/час</i>	0,5 <i>гамма/час</i>
Тип фильтра	Двухзвенный Г-образный $n=1$ $\tau = 100$ <i>сек</i> ФЭУ-2	Однозвенный Г-образный, $\tau = 40$ <i>сек</i> ФЭУ-2
Тип фотопреобразователя		
Тип усилительных ламп	2П2П	2П2П
Тип осциллографа	ЭПО-8	ЭПО-9
Число основных источников питания: накальные, анодные, ФЭУ (без питания осциллографа)	6	3
Число вспомогательных источников питания (типа «Сатурн» и т. п.)	8	3
Тип накальных источников питания	2 НКН 24	2 НКН 24
Тип анодных батарей	ГРМЦ-69 100 АМЦГ 2.0	32 АКН 2.25 —
Потребляемая мощность магнитными каналами без осциллографа		
а) фильтры КПК выключены	1,6 <i>вт</i>	1,2 <i>вт</i>
б) фильтры КПК включены	2,3 <i>вт</i>	1,75 <i>вт</i>

Наименование параметра, детали, узла	Станция ГГ42-1	Станция ГГ4-22
Потребляемая мощность с осциллографом (пружинный привод)	2,2—2,9 <i>вт</i>	1,8—2,35 <i>вт</i>
Потребляемая мощность с осциллографом (электрический привод 12 в)	до 6—8 <i>вт</i>	до 6—8 <i>вт</i>
Продолжительность непрерывной работы станции со свежим комплектом питания	Не менее 100 ч	Не менее 100 ч
Гарантийный срок непрерывной работы станции	5—8 суток	7—10 суток
Интервал температур, при котором блок магнитных датчиков сохраняет работоспособность	от—35° до+40°С	от—35° до+40°С
Интервал температур для остальных блоков	от—10° до+40°С	от—10° до+40°С
Тип контактных часов	МХ-6 (морской хронометр)	МХ-6, АЧХ
Тип стрелочного индикатора на пульте управления	М-24 (0—100 <i>мкв</i>)	М-24 (100,0— —100 <i>мкв</i>)
Тип стрелочного индикатора на эталонировочном пульте	—	М-109 50—100—500 —1000 <i>мкв</i>
Постоянная эталонировочных колец	3,8 <i>гальма/ма</i>	20 <i>гальма/ма</i>
Электрические каналы		
Чувствительность электрического канала с гальванометром $C_1 = 10^{-8}$ а/м.м/м при сопротивлении заземления 500 ом	до 80 $\frac{\text{м.м}}{\text{мв}}$	до 80 $\frac{\text{м.м}}{\text{мв}}$
Пределы компенсации постоянной э. д. с. в E-канале	0—300 <i>мв</i>	0—300 <i>мв</i>
Тип электродов для заземлений	Свинцовые пластины	Свинцовые пластины
Общий вес комплекта станции в упаковке (с источниками питания)	Около 150 кг	Около 140 кг

эталонировки магнитных и электрических каналов состоит из пульта, эталонировочного кольца и установочной рамы.

Передняя панель эталонировочного пульта показана на рис. 36. На панели имеется стрелочный прибор типа М109, по которому отсчитывается величина тока, посылаемого в обмотку эталонировочного кольца. Установка тока полного отклонения по прибору М109 производится ручкой «Уст. тока». Переключателем «Этал. ток» выбираются следующие значения шкалы прибора: 50, 100, 500 и 1000 *мкА*. К клеммам *I* подключается обмотка эталонировочного кольца. К клеммам *U* подключаются провода, которые другими своими концами подходят к клеммам E_1 или E_2 на пульте управления. Выбор величины эталонировочного напряжения осуществляется ручками «Ток» и «Множитель». Эталонировка магнитного или электрического канала задается тумблером в положении *I* или *U*.

Через разъем «Питание» подводятся напряжения к испытательной панельке для ламп типа 2П2П. Тумблером «Смещение» подается отрицательное смещение на испытываемую лампу.

Эталонировочное кольцо представляет собой круглый диск, в канавке которого уложена обмотка. Постоянная этой обмотки — 20 *гамм/ма*. Кольцо с помощью винта прикрепляется к датчику того магнитного канала, который хотят проэталонировать. Размеры кольца превышают габариты блока магнитных датчиков, поэтому для удобства эталонирования используется установочная рама.

Прочие вспомогательные устройства. Кабели и провода. В станции ГГ42-2 имеются следующие кабели. Длинный кабель (30 м) для дистанционного управления блоком магнитных датчиков. Обычно используют в качестве этого соединения телефонный кабель типа ТРВКШ (23-жильный). Имеется также три коротких гибких кабеля: два из них предназначены для подведения питания к магнитным каналам и к осциллографу, третий — для соединения пульта управления с осциллографом. В качестве линий для измерения теллурических вариаций используются провода типа ПВР (экспедиционный вариант) и ПУМ, ПСМ (стационарный вариант).

Контактные часы. В качестве контактных часов для нанесения меток времени на осциллограмму используют часы типа АЧХ, вмонтированные в осциллограф, дающие метки с интервалом в 5 *сек*. Рекомендуется также включать в комплект станции ГГ42 контактные часы типа МХ (морской хронометр) с интервалом между метками в 1 *мин*. В комплексе станции ГГ42-2 имеется буссоль БС-2, используемая для ориентирования блока магнитных датчиков по азимуту и для ориентиро-

вания измерительных линий при регистрации электрических вариаций.

В качестве электродов для заземлений линий E -каналов используются свинцовые пластины размером $300 \times 300 \times 3$ мм³ (4 шт.). Для обеспечения надежного контакта блока магнитных датчиков с землей и для лучшей амортизации от колебаний грунта имеются свинцовые подушки (3 шт.). В комплект станции ГГ42-2 входят также запасные подвески для магнито-статических датчиков, набор постоянных магнитов и других запасных изделий.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ, НАСТРОЙКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ АППАРАТУРЫ

Основные требования к эксплуатации и транспортировке станции ГГ42

Влияние промышленных электромагнитных помех. Микровариационная станция ГГ42 является высокочувствительным прибором, и максимальная чувствительность его может быть реализована лишь в том случае, если уровень промышленных помех в месте проведения измерений не превышает уровня собственных шумов в схеме. Электромагнитные промышленные помехи широко распространены вокруг крупных городов, больших энергетических установок, линий электропередач и т. п. Особенно сильное влияние на микровариационную аппаратуру оказывают установки, работающие с постоянными токами в нестационарном режиме. Низкочастотный конец спектра промышленных помех накладывается на диапазон микровариаций типа КПК, поэтому эффективных мер борьбы с помехами не существует.

Расстояние от источников электромагнитных помех, на котором их влияние мало, выбирается в пределах от десятков до сотен километров. По форме колебаний промышленные помехи довольно хорошо отличаются от колебаний естественного поля, поэтому их уровень можно оценить с помощью микровариационных приборов. Выбор места для проведения микровариацион-

ных измерений устанавливают путем пробной регистрации электромагнитных полей в ряде точек.

В соответствии с уровнем помех выбирается обычно и чувствительность измерительных каналов: цена деления принимается равной среднему уровню помех, существующему в районе исследований.

Влияние метеорологических факторов и борьба с ними. Наиболее подвержен влиянию метеорологических факторов блок магнитных датчиков. Непостоянство температуры влияет в основном на магнитные датчики. Температурная стабилизация датчиков не может быть идеальной, поэтому резкие изменения температуры могут вызвать соответствующие отклонения датчиков.

На элементах электронной схемы неблагоприятно сказывается высокая температура. В фотоумножителях (фотоэлементах) возрастает термоэлектронная эмиссия, что, естественно, ведет к ухудшению стабильности магнитных каналов. Резкие колебания температуры сказываются и на элементах электрической схемы, хотя это влияние носит, пожалуй, второстепенный характер. Как показывает опыт эксплуатации станции ГГ-42, низкие температуры (от $+5^{\circ}$ до -15° С) более благоприятны для работы прибора. Для защиты от колебаний температуры и других факторов блок магнитных датчиков рекомендуется устанавливать в яму, вырытую в земле в соответствии с габаритами прибора, и сверху закрывать ее теплоизоляционным материалом, например, войлоком. В летнее время это защищает также от действия высоких температур.

Влияние влаги проявляется в том, что сопротивления высокоомной анодной цепи фотоумножителя (или фотоэлемента) могут изменяться от степени влажности. При высокой влажности на линзах и зеркалах оптической системы может образовываться пленка воды, что ведет к изменению интенсивности света. В блоке магнитных датчиков предусмотрены специальные меры защиты от влаги. В процессе эксплуатации прибора нельзя допускать загрязнения элементов блока магнитных датчиков, так как места загрязнений наиболее подвержены утечкам. Не рекомендуется также в процессе измерений открывать без особой надобности крышку блока магнитных датчиков, особенно в условиях высокой влажности.

Регистрирующая часть аппаратуры ГГ42 (пульт управления, осциллограф) обычно располагается в сухом месте, лучше всего в помещении, а зимой — только в помещении, где температура не ниже $0 \div -5^{\circ}$ С.

Влияние механических колебаний. Механическим помехам (колебаниям грунта, ветра и т. п.) подвержены прежде всего чувствительные системы магнитных датчиков и гальванометров. Блок датчиков устанавливают на надежном основании так, чтобы исключить возможность какого бы то ни было оседания прибора. Обычно установка производится на колыях, глубоко вбитых в землю. Хорошо устанавливать этот блок на свинцовых подушках, которые предварительно утрамбовываются в грунт. Не рекомендуется помещать блок магнитных датчиков вблизи деревьев. Надежно защитить от ветра блок магнитных датчиков можно, установив его, как указывалось выше, в яму, плотно закрываемую сверху. Провода для *E*-каналов и кабели прибора с целью уменьшения электрических наводок, возникающих при их колебаниях, прижимаются к земле, а в некоторых случаях даже зарываются в землю.

Блоки контроля и регистрации также нужно устанавливать на жестком основании и защищать от ветра.

Роль электрических контактных соединений. В электрической схеме микровариационной станции ГГ42, работающей, как правило, в условиях высокой влажности, запыленности и других неблагоприятных факторов, совершенно особую роль играют разъемноконтактные электрические соединения. Действительно, переходные сопротивления между электрическими контактами не обладают высокой стабильностью в силу ряда причин: сильной зависимости переходного сопротивления от степени окисления контактирующих поверхностей, величины давления между контактной парой и других. Как было установлено выше, относительная погрешность, вносимая активными элементами электрической схемы (пассивные элементы почти не рассматривались), составляет около 10^{-5} . Следовательно, для любой электрической цепи, входящей в схему микровариационной станции, величина флуктуирующего сопротивления (значительная часть которого приходится на контактные соединения) должна составлять менее сотых долей от величины полного сопротивления электрической цепи. Роль контактных соединений особенно велика в низкоомных цепях, например в цепях питания электрической схемы.

Особое внимание в микровариационной станции ГГ42 (да и в любых приборах подобного типа) должно быть уделено цепи питания осветительной лампы. Ток в этой цепи проходит через ряд разъемов, выключатель и аккумуляторные клеммы. За чистотой контактных соединений ведется постоянное на-

блюдение. Необходимо как можно чаще проводить профилактику контактных соединений этой цепи, особенно контактных клемм на аккумуляторах, подвергающихся сильной коррозии. Рекомендуется применять никелированные кабельные наконечники и питание подводить от щелочных аккумуляторов с винтовыми клеммами. Нежелательно применение в полевых условиях кислотных аккумуляторов для питания цепей накалов. Патроны для осветительной лампы должны иметь контакты с серебряным покрытием. Иногда провода, подводящие питание к осветительной лампе, припаивают непосредственно к цоколю. Влияние контактных соединений значительно ослабляется цепями автокомпенсации по напряжению, питающему осветитель, поэтому надежность работы этой цепи должна регулярно проверяться (см. «Настройка основных электрических узлов»).

Высокие требования предъявляются к контактам (хотя и менее жесткие, чем к осветителю) в цепях накалов электронных ламп.

Роль контактных соединений в цепях анодного питания невелика.

Систематические наблюдения и профилактика во время эксплуатации микровариационной станции ГГ42 проводятся за состоянием контактов у всех переключателей и переменных сопротивлений, имеющих в схеме.

Особо следует выделить переменные сопротивления в цепях компенсации постоянной э.д.с. в магнитных и электрических каналах (компенсация «Грубо» и «Точно»). Надежными контактами должны обладать переключатели чувствительности у всех измерительных каналов и переключатели фильтров КПК.

В осциллографе регулярно проверяется качество соединений в цепи гальванометров: в разъемах и контактных наконечниках у гальванометров.

Датчики магнитного поля. Магниточувствительные элементы датчиков не имеют арретиров. Поэтому безаварийная работа станции возможна только при условии осторожного обращения с датчиками, особенно во время их транспортировки. Следует избегать резких ударов во избежание обрыва магниточувствительного элемента.

В рабочем положении растяжки H и D -датчиков должны быть строго вертикальны, растяжка Z -датчика горизонтальна в направлении С — Ю. Необходимые направления датчиков задаются первоначально путем их юстировки относительно корпуса, где они размещены, в дальнейшем — путем установки корпуса по уровню и буссоли.

Северные концы подвижных магнитов должны быть направлены для *D*-датчика на север, для *H* и *Z*-датчиков — на восток. Датчики должны быть настроены на нормальное магнитное поле внутренними постоянными магнитами с тем, чтобы не применять сильных внешних магнитов (магниты грубой настройки).

Оптика. К осветительной лампе предъявляются следующие требования: напряжение — 2,5 в; сила тока — 0,2—0,5 а; диаметр лампы — не более 16 мм; нить накала — строго в центре лампы. Оптика считается нормальной, если выполняются следующие требования: а) поверхности оптических деталей — сухие и чистые; б) оси оптических систем совпадают с главными «оптическими осями» блока магнитных датчиков (оптические оси нанесены в виде рисок); в) световые индексы падают на середины всех зеркал датчиков; г) световые индексы имеют размеры: по ширине 3—4 мм, по высоте — не менее 15 мм; д) световые индексы однородные (оцениваются визуально на белом фоне) и четкие (края индексов в плоскости диафрагм фотоумножителей не должны быть размытыми); е) высота отверстия диафрагм фотоумножителя — около 10 мм и вырезает среднюю часть светового индекса.

Фотоумножители ФЭУ-2, применяемые в приборе, считаются пригодными к эксплуатации, если они удовлетворяют следующим требованиям: а) фотокатод не имеет повреждений; б) на поверхности фотоумножителя и внутри кожуха, в котором помещается фотоумножитель, нет пыли и влаги; в) фотоумножитель имеет достаточную чувствительность (при оптимальной засветке ток фотоумножителя не менее 0,2 мка); г) малый уровень шумов; приведенное значение шумов — не более 0,01 гаммы (о способе оценки шумов см. ниже).

Источники питания. Аккумуляторы и батареи должны находиться в сухих местах при температуре не ниже -5°C . К источникам питания, применяемым в станции ГГ42, предъявляются повышенные требования относительно их чистоты. Номинальные значения питающих напряжений и допустимые пределы их изменений даны в табл. 3 и 5. Требования к параметрам электрической схемы станции ГГ42-1 и ГГ42-2 приведены выше в табл. 4 и 6.

Осциллограф. Гальванометры должны иметь свободное движение и не «залипать» при случайном их зашкаливании. У гальванометров регулярно проверяется натяжение рамок и линейность измерений. Нелинейность в пределах шкалы осциллографа должна быть не хуже 2%, в противном случае

гальванометр необходимо заменить. Световые блики гальванометров должны быть тщательно сфокусированы: запись линии на фотобумаге должна быть четкой и иметь толщину не более 0,8 мм. Лентопротяжный механизм осциллографа должен обеспечивать равномерное движение бумаги на всех пределах переключателя скорости. Оптическая система осциллографа должна поддерживаться в чистоте.

Основные параметры осциллографа даны выше в описании конструкции ГГ42-1.

Транспортировка станции ГГ42. Станция ГГ42 является точным прибором, включающим в себя элементы оптики, точной механики и электроники, и поэтому не может считаться в полном смысле походным прибором. Однако специфика полевых магнитотеллурических исследований такова, что значительная часть рабочего времени (иногда до 50% и более) затрачивается на транспортировку аппаратуры с одного пункта наблюдения на другой и на различные операции, связанные с приведением аппаратуры в походное состояние и наоборот. Опыт показывает, что в основном аппаратура выходит из строя именно при транспортировке, при которой неизбежны случайные удары, сотрясения и т. п. Поэтому принимаются всевозможные меры по соблюдению осторожности при транспортировке, по обеспечению надежной амортизации аппаратуры с целью предотвращения возможных аварий. Наиболее чувствительными элементами станции ГГ42 к ударам являются магнитные датчики и оптическая система блока магнитных датчиков, гальванометры и оптическая система осциллографа и контактные часы (морской хронометр). В меньшей мере сотрясения и удары сказываются на элементах электронной схемы. Блок магнитных датчиков и контактные часы рекомендуется перевозить в мягкой упаковке (завернутые в ватные тюфяки, губчатую резину и т. п.). Гальванометры в нерабочем состоянии должны быть закорочены. Осциллограф перевозится в мягкой упаковке или в специальном кронштейне на пружинных амортизаторах.

Установка станции

Установку станции для проведения измерений производят в местах, где промышленные помехи не превышают заданную погрешность измерений. Предварительно, если в данном районе не проводилось магнитотеллурических исследований, проводится определение уровня помех.

Порядок установки аппаратуры состоит в следующем. Пульт управления и контроля, осциллограф и блок питания устанавливаются в сухом помещении (в палатке, в специально оборудованной автомашине или в любом другом помещении), где температура не ниже $0 - 5^{\circ}\text{C}$. Помещение должно быть затемнено для удобства визуального наблюдения пишущих бликов на шкале осциллографа. Взаимное размещение бликов должно обеспечивать нормальные условия работы для наблюдателя (оператора): шкала осциллографа должна находиться на уровне глаз наблюдателя, пульт управления — рядом с осциллографом в горизонтальном положении. Источники питания размещаются в сухом, проветриваемом месте.

Блок магнитных датчиков устанавливается вне помещения на расстоянии длины соединительного кабеля. В месте установки блока магнитных датчиков должно быть исключенохождение людей и животных в радиусе не менее 15 м, а также движение автомашин, тракторов и т. п. в радиусе не менее 100—150 м. Рядом с прибором не должно находиться железных предметов. В выбранном месте выкапывается яма размером $0,7 \times 0,7 \text{ м}^2$ и глубиной 0,3 м. Направление сторон ямы должно быть приблизительно ориентировано в направлении С — Ю, В — З. На дно ямы устанавливается блок магнитных датчиков и приблизительно ориентируется по буссоли. Направление для ориентирования указано на крыше блока соответствующими рисками и буквами С — Ю, В — З. Под установочные винты подводятся опорные свинцовые подушки, которые тщательно утрамбовываются в грунт. С помощью установочных винтов прибор нивелируется по уровню, затем вновь ориентируется по буссоли (погрешность ориентирования — не более $0,5^{\circ}$). Нажатием на корпус блока сверху необходимо вдавить установочные винты в свинцовые подушки, застопорить контргайки, после чего проверить установку по уровню и по буссоли.

Размотку проводов для измерения напряженности земного электрического поля (для измерения теллурических токов) производят в направлениях С — Ю, В — З, т. е. в соответствии с направлением магнитных компонент*.

Провешивание направлений для укладки проводов производится с помощью буссоли БС-1 (БС-2). Расстояние между

* В некоторых случаях установка блока магнитных датчиков (с датчиками на металлических растяжках) и укладка проводов для Е-каналов может производиться в азимуте, отличном от С — Ю, В — З. В этом случае датчики магнитного поля должны быть перестроены на новое значение нормального поля, соответствующее выбранному азимуту (см. «Настройка магнитных датчиков»).

заземлениями линий определяется по меткам на проводах. Свинцовые электроды (пластины) закапывают на глубину 0,3—0,5 м и утрамбовывают. Если грунт сухой, его увлажняют водой. Концы проводов присоединяют к выводам электродов, другие концы перед началом измерений замыкают (для того, чтобы произошло установление нестационарных токов в измерительной цепи). Для уменьшения ветровых помех провода прижимают к земле колышками, присыпают землей, а иногда полностью закапывают в землю.

Включение

Предварительные замечания. В магнитных каналах станции ГГ42-1 установлено одно значение обратной отрицательной связи. В станции ГГ42-2 имеется два фиксированных значения обратной связи β_1 и β_2 . Более глубокая обратная связь (β_2) обеспечивает повышенную стабильность магнитных каналов (и соответственно уменьшает чувствительность). Обратная связь β_1 обеспечивает более высокую чувствительность магнитных каналов. Во всех случаях регистрации, если только чувствительность магнитного канала оказывается достаточной, рекомендуется включать глубокую обратную связь (разъемы в блоке магнитных датчиков, которыми производится переключение β_1 и β_2 , замкнуты). При регистрации короткопериодических колебаний ($T=0,2—500$ сек) используют более слабую обратную связь: соответствующие разъемы разомкнуты.

В процессе включения и регулировки прибора приходится часто открывать крышку блока магнитных датчиков. При этом необходимо оберегать прибор от прямых солнечных лучей, так как интенсивный свет может вывести из строя фотумножители, особенно, если на них подано напряжение. Прибор следует затенять также в тех случаях, когда производится визуальное наблюдение за световыми индексами. Для визуального наблюдения световых индексов на свету используют также смотровые люки на крышке блока магнитных датчиков.

Во время проведения любых операций, связанных с настройкой блока магнитных датчиков, нельзя иметь при себе никаких железных и других магнитных предметов (часов, отверток и т. д.).

Станция ГГ42-1. Включение магнитных каналов.

а. Подключают соединительный кабель к блоку магнитных датчиков и к пульту управления.

б. Подключают кабель «Питание».

в. Ручки магнитных каналов устанавливаются в следующие положения: «Фильтр КПК» — в положение выключено; «Чувствительность» — в левое крайнее положение; «Компенсация грубо» и «точно» — примерно в средние положения; тумблер «Шунт» включить.

г. Производят контроль питающих напряжений.

Все операции контроля, осуществляемые двумя переключателями «Контроль», сведены в табл. 8. При контроле питающих напряжений следует руководствоваться данными, приведенными в табл. 3.

д. Производят измерение максимальных значений анодных токов в магнитных каналах — $I_{a_{\max}}$. При этом тумблеры «Свет» и «ФЭУ» должны быть выключены. Значения $I_{a_{\max}}$ приведены в табл. 4.

е. Производят настройку магнитных каналов и устанавливают рабочие анодные токи.

Рабочие анодные токи I_{a_0} определяются из расчета $I_{a_0} = \frac{3}{5} I_{a_{\max}}$ (см. также табл. 4) и устанавливаются путем наве-

Т а б л и ц а 8

Правый переключатель положения слева направо	Левый переключатель положения слева направо	Выполняемая операция
I (I_a)	I (H)	Измерение анодного тока в лампе Л1 (канала H)
I (I_a)	II (D)	То же, в канале D
I (I_a)	III (Z)	То же, в канале Z
II (I_k)	I (H)	Компенсация постоянной составляющей сигнала в канале H
II (J_k)	II (D)	То же, в канале D
II (J_k)	III (Z)	То же, в канале Z
III (Γ_r)	Любое	Измерение опорного градуировочного тока
IV (напр.)	I (накал H)	Контроль напряжения накала в канале H
IV (напр.)	II (накал D)	То же, в канале D
IV (напр.)	III (накал Z)	То же, в канале Z
IV (напр.)	IV (свет)	Контроль напряжения осветителя
IV (напр.)	V (анод)	Контроль напряжения анода

дения световых индексов на фотоумножители. Для этого необходимо включить тумблеры «Свет» и «ФЭУ» и ввести в отверстие соответствующей диафрагмы часть светового индекса; при этом выбор области устойчивого положения светового индекса произойдет автоматически.

Световые индексы устанавливаются в рабочее положение в общем случае в два этапа: сначала осуществляется грубая магнитная компенсация с помощью магнита, укрепленного на внешней шине датчика, затем точная компенсация с помощью магнита, ручка которого выведена наружу.

Такая последовательность магнитной компенсации датчиков соблюдается в тех случаях, когда изменение компонент поля Земли от одного пункта наблюдения к другому превосходит диапазон поля плавного компенсирующего магнита. В остальных случаях компенсация грубым магнитом не рекомендуется.

Иногда причиной невозврата датчика в положение равновесия является не только изменение нормального поля Земли, но также механическое «залипание» подвижной системы датчика, происходящее из-за чрезмерно высокой чувствительности магнитной системы или ослабления натяжения ее растяжки. Датчики, у которых магнитная система имеет неустойчивое равновесие, рекомендуется перестраивать, если позволяет их конструкция (см. «Настройка магнитных датчиков»), или заменять новыми.

Расстояние грубого компенсирующего магнита от центра датчика выбирается из такого расчета, чтобы создаваемое им поле в центре датчика не превосходило 20% от величины нормального поля соответствующей компоненты в данной точке.

Для магнита плавной компенсации выбирается приблизительно среднее положение, чтобы с его помощью можно было отклонять световой индекс в обе стороны от отверстия диафрагмы примерно на одинаковые расстояния ($1 \div 1,5$ см в каждую сторону).

После грубой установки световых индексов приступают к плавной их регулировке. Наблюдая за показаниями стрелочного индикатора, ручкой плавной магнитной компенсации устанавливают номинально необходимую величину рабочего тока.

ж. Закрывают яму, где установлен блок магнитных датчиков (фанерой, войлоком и т. п.).

з. Компенсируют постоянные составляющие напряжений, поступающих с выхода усилителей. Для этого стрелочный индикатор подключается поочередно в цепь компенсатора каждого магнитного канала (см. табл. 8) и ручками «Компенсация грубо» выводят стрелку индикатора на нуль. Выключают

тумблер «Шунт» и ручками «Компенсация точно» добиваются более точной установки стрелки на нуль.

п. Подключают кабель к разъему с надписью «К осциллографу». Каждый раз перед включением осциллографа необходимо убедиться в том, что величина нескомпенсированного тока равна или близка к нулю. При большом нескомпенсированном токе гальванометры в осциллографе могут выйти из строя.

к. Включают свет в осциллографе и выводят блики гальванометров на шкалу осциллографа с помощью ручек «Компенсация точно». Тумблер «Шунт» при подключенных гальванометрах осциллографа должен быть выключен. Во время регистрации стрелочный прибор должен быть отключен от цепи компенсации, так как в противном случае он может шунтировать один из трех гальванометров в магнитных каналах.

л. Переключателями «Чувствительность» устанавливают требуемую цену деления магнитных каналов по шкале осциллографа. При определении цены деления пользуются градуировочным устройством. Для этого выбирают необходимый канал ручкой «Градуировка», переводят правую ручку «Контроль» в положение Гр; ручкой «Магнитный импульс γ » устанавливают величину градуировочного отклонения с таким расчетом, чтобы соответствующее отклонение гальванометра находилось в пределах шкалы осциллографа; ручкой «Полярность» производят включение градуировочного импульса, предварительно установив стрелку индикатора с помощью ручки «Опорный ток» на отметку «100».

Если, например, подается градуировочный импульс 2γ , а наблюдаемое по шкале осциллографа (или записанное на фотобумаге) отклонение гальванометра составляет 40 мм, то цена деления магнитного канала, соответствующая выбранному положению ручки «Чувствительность», будет $\epsilon = 0,05 \frac{\text{гамма}}{\text{мм}}$.

При работе с фильтрами КПК порядок включения следующий:

а. Производят все операции, изложенные выше в пунктах а—е.

б. Переводят ручки «Фильтры КПК» в правое положение «вкл.» После этого необходимо выждать примерно 10—15 мин. Это время, необходимое для того, чтобы полностью зарядились емкости фильтров.

в. Проверяют величину нескомпенсированного тока и устанавливают стрелку индикатора на нуль ручками «Компенсация грубо» и «Компенсация точно» (при не полностью заряженных фильтрах стрелка индикатора будет смещаться с нуля).

г. Включают осциллограф после того, когда зарядка фильтров прекратится.

д. Устанавливают необходимую чувствительность магнитных каналов так же, как в предыдущем случае. Необходимо при этом иметь в виду, что при включенных фильтрах градуировочное отклонение отсчитывается приближенно по первому отбросу гальванометра.

Для выключения магнитных каналов необходимо: сначала разъединить разъем «К осциллографу», затем разъединить разъем «Питание».

Включение электрических каналов. Присоединяют провода, идущие от заземленных электродов к клеммам E_1 и E_2 . Предварительно переключатели «Чувствительность» переводятся в левое крайнее положение. Включают тумблер «КП». Включают осциллограф и ручками компенсаторов «Грубо» и «Точно» выводят блики гальванометров на шкалу осциллографа. Повышают чувствительность электрических каналов до необходимой величины, одновременно предупреждая защипывание бликов гальванометров с помощью ручек компенсаторов. Цепя деления электрических каналов определяется так же, как и для магнитных. Величина градуировочного отклонения выбирается ручкой «Эл. импульс mV ».

Станция ГГ42-2. Включение станции ГГ42-2 принципиально почти не отличается от способа включения, рассмотренного для станции ГГ42-1. Поэтому перечисляя основные моменты включения ГГ42-2, будем останавливаться лишь на тех пунктах, которые характерны для данного прибора.

а. Соединяют блок магнитных датчиков с пультом управления (подключают кабель).

б. Выбирают необходимую глубину обратной отрицательной связи путем замыкания или размыкания соответствующих разъемов, находящихся в блоке магнитных датчиков (при замкнутых разъемах обратная связь глубже).

в. Присоединяют кабель «Питание».

г. Ручки магнитных каналов устанавливают в следующие положения: «Фильтр КПК» — в положение выключено; «Чувствительность» — в левое крайнее положение; «Компенсация грубо» — в нулевое положение — «0»; «Компенсация точно» — примерно в среднее положение; тумблер «Шунт» — включен.

д. Производят контроль питающих напряжений: накала, анода и фотомножителей. Соответствующие положения на переключателе «Контроль» обозначены U_H , U_A , U_F . Питающие напряжения должны соответствовать данным, приведенным в табл. 3.

е. Устанавливают номинальное напряжение накала ручкой «Напр. накала». Напряжение накала, отсчитываемое по шкале стрелочного индикатора, должно быть не более 2,5 в (50 делений шкалы). Установку этого напряжения производят при включенном тумблере «Свет».

ж. Производят настройку магнитных каналов. Способ настройки блока магнитных датчиков остается таким же, как для ГГ42-1. Стрелочный прибор подключают поочередно в цепь компенсации постоянной составляющей напряжения каждого магнитного канала (первые три положения ручки «Контроль». Тумблер «Шунт» включен). Ручками плавной магнитной компенсации устанавливают стрелку индикатора в каждом магнитном канале на нуль*.

Поскольку в этой станции не ведется контроль по анодному току, правильность работы фотоэлектрических преобразований можно оценить следующим образом. При отсутствии тока в цепи компенсации магнитных каналов (ручки «Компенсация грубо» находятся в нулевом положении). Световые индексы у H - и D -датчиков не должны заходить в отверстие диафрагмы более, чем на $1/3$ своей ширины, у Z -датчика — не более половины ширины индекса.

з. Закрывают яму, где установлен блок магнитных датчиков.

и. Выключают тумблер «Шунт» и производят окончательную компенсацию тока во всех каналах с помощью ручек «Компенсация точно». В процессе измерений, если пределы точного компенсатора окажутся недостаточными, пользуются ручками «Компенсация грубо». Грубыми компенсаторами рекомендуется пользоваться только в небольших пределах (вблизи их нулевого положения).

Дальнейшие операции, а также включение фильтров КПК и электрических каналов производятся в той же последовательности, что и для станции ГГ42-1**.

Регистрация естественных электромагнитных полей

Особенности регистрации естественных полей. Общепринятым способом записи той информации, которая поступает от магнитных и электрических каналов микровариан-

* Обычно эту операцию выполняют два человека. Один из них находится около блока магнитных датчиков, другой — у пульта управления.

** Включение фильтров КПК в данной станции начинают после настройки магнитных каналов (см. пункт ж).

ционных приборов, является фотографический способ. Другие способы, например магнитный, имеют пока ограниченное применение. Способ фотографического осциллографирования обеспечивает максимальную чувствительность микровариационной аппаратуры. Осциллограммы, полученные фотографическим способом, обладают большой наглядностью и позволяют выбрать наиболее необходимую информацию. Но вместе с тем процесс получения этой информации связан с определенными техническими трудностями, которые определяются в основном специфическими особенностями измеряемых электромагнитных полей.

Естественные электромагнитные поля сложны по природе и для их регистрации необходимы определенные практические навыки. В каждом конкретном случае требуется регистрировать тот или иной участок спектра вариаций, например, короткопериодический (с периодами от долей секунды до сотен секунд), длиннопериодный (с периодами в тысячи и десятки тысяч секунд) или одновременно весь спектр. Опыт показывает, что одновременно регистрировать весь спектр чрезвычайно трудно, ибо различие между краями спектра естественных вариаций огромно как по частотным, так и по амплитудным характеристикам. Так, временной масштаб вариаций типа КПК и типа «бухт» отличается примерно в 100 раз, амплитудный масштаб — также отличается в десятки раз. Поэтому при масштабе записи для вариаций типа КПК, обеспечивающем удобное их разрешение, неизбежно возникнут технические трудности воспроизведения вариаций типа «бухт» и, наоборот, при приемлемом масштабе для длиннопериодных и достаточно интенсивных вариаций невозможно получить должное разрешение для вариаций КПК.

Следовательно, если ставится задача измерения широкого спектра вариаций, то для удобства регистрации лучше разбить его на части и каждую часть исследовать отдельно.

Но даже для какого-либо одного типа вариаций невозможно заранее предугадать ни характер их протекания, ни их интенсивность, так как и то и другое определяется многими неизвестными факторами и, прежде всего, характером источника данных возмущений и геоэлектрическими условиями района, в котором проводятся измерения. По этой причине чувствительность измерительных каналов приходится устанавливать интуитивно и в результате происходит большая потеря информации: вариации на осциллограмме либо слишком малы (чувствительность выбрана низкая), либо выходят за пределы осциллограммы (если чувствительность выбрана чрезмерно высокой).

Вероятность потери информации возрастает еще больше, если одновременно регистрируются пять составляющих естественного электромагнитного поля (H , D , Z , E_1 , E_2), так как неправильная работа хотя бы одного измерительного канала делает малопригодной всю остальную информацию.

Магнитные каналы микровариационной станции ГГ42 могут работать как с открытым входом со стороны низких частот, т. е. в режиме регистрации суммарных вариаций (фильтры КПК выключены), так и с включенными фильтрами КПК, когда полоса пропускания магнитного канала со стороны низких частот ограничена фильтром.

Рассмотрим достоинства и недостатки каждого режима регистрации. В первом режиме (т. е. при регистрации суммарных вариаций) магнитные каналы работают линейно во всем диапазоне частот, начиная от частоты (0,2—0,3) f_0 и ниже (f_0 — собственная частота датчика). Этот режим выбирают во всех случаях измерений, когда амплитудные и фазовые искажения должны быть минимальны. При такой регистрации имеются недостатки: во-первых, требуется постоянное визуальное наблюдение за бликами всех регистрирующих гальванометров; во-вторых, при высокой чувствительности измерительных каналов теряется много информации из-за того, что интенсивные вариации часто уводят пишущий блик гальванометра за пределы шкалы (происходит частое зашкаливание гальванометров).

В режиме фильтрации короткопериодических колебаний потеря информации значительно меньше, так как пишущий блик реже уходит со шкалы; существенно упрощается и работа наблюдателя. Недостаток этого режима регистрации состоит в том, что получаемые материалы измерений обрабатывать труднее, чем в первом случае, поскольку необходимо учитывать частотные, фазовые и переходные характеристики измерительной системы. Работа с фильтрами КПК рекомендуется только при исследовании диапазона вариаций выше 0,01 μ , где преобладают гармонические колебания.

Методика регистрации. Наиболее общие требования к регистрации сводятся к следующим.

а. К началу регистрации должен быть подготовлен осциллограф. Пишущие блики гальванометров должны давать на фотобумаге тонкие, четкие линии. Отметчик времени должен очерчивать тонкие, четкие линии по контрастности несколько ниже, чем у гальванометров. Перед регистрацией рекомендуется сделать пробную запись в течение нескольких минут, чтобы убедиться в исправности осциллографа.

б. Выбирают необходимую чувствительность регистрирующих гальванометров. В процессе измерений не рекомендуется часто менять чувствительность.

в. Запускают отметчик времени. Контактные часы, вмонтированные в осциллографе, запускаются кнопкой. Внешние контактные часы типа «Морской хронометр» подключаются к клеммам «КЧ». Часы должны быть проверены по сигналам точного времени. Поправку хронометра записывают в журнал. Выводят пишущие блики гальванометров в среднюю часть шкалы.

г. Включают мотор осциллографа и устанавливают необходимую скорость движения фотобумаги. Во время регистрации следят, чтобы пишущие блики гальванометров находились в пределах шкалы осциллографа. Зашкаливание гальванометров предупреждают ручками компенсаторов «Точно». Если ушедший с поля зрения блик вернуть невозможно (известна полярность зашкаливания), в магнитных каналах используют стрелочный индикатор, который включают в цепь компенсации соответствующего канала. После возвращения блика на шкалу стрелочный индикатор отключают от цепи компенсации и ставят в положение «Гр» (в его нормальное положение).

д. Периодически контролируют режимы питания. В случае отклонения питающих напряжений от допустимых норм необходимо немедленно заменить соответствующую батарею или аккумулятор.

е. Периодически контролируют рабочие режимы магнитных каналов: в станции ГГ42-1 контроль ведется по анодному току, в станции ГГ42-2 — по положению ручки «Компенсация грубо».

ж. Периодически измерительные каналы градуируют. При продолжительной регистрации градуировка производится не реже одного раза в течение 6 часов, при непродолжительной регистрации — в начале и в конце записи.

Для градуирования измерительных каналов необходимо выбирать моменты с относительно спокойным (слабовозмущенным) ходом электромагнитных вариаций. Это условие обязательно при градуировании магнитных каналов с включенными фильтрами.

Длительность включения прямоугольного импульса измеренная на осциллограмме, должна быть не менее 10 мм, такого же порядка должны быть интервалы между соседними импульсами. Амплитуда отклонения градуировочного импульса на фотобумаге должна быть 40—50 мм. Для каждого канала подается не менее двух импульсов (по одному импульсу в каждую сторону) при условии их высокого качества, т. е. искажений со стороны внешних возмущений нет.

При градуировании магнитных каналов с включенными фильтрами время между включением и выключением импульса выбирается в зависимости от постоянной фильтра. Выключение и последующее включение обычно производят после того, как градуировочный импульс от предыдущего включения или выключения уменьшится на 80—90% от его максимального значения. В момент включения (выключения) импульсов внешние магнитные возмущения должны быть минимальны. При вынужденном изменении чувствительности измерительных каналов градуировка повторяется на тех же каналах, чувствительность которых изменилась.

з) Перед началом регистрации и во время регистрации ведется полевой журнал, куда записываются следующие данные:

Перед началом регистрации

1. Наименование отряда, экспедиции и т.д.
2. Наименование района, пункта, где производятся измерения.
3. Координаты пункта измерений или топографическая привязка по местным ориентирам.
4. Дата проведения измерений (число, месяц, год).
5. Наименование и тип измерительной установки.
6. Азимут установки магнитных и электрических каналов.
7. Величина разносов электроизмерительных линий.
8. Поправка хронометра.
9. Чувствительность регистрирующих каналов, установленная перед измерениями (чувствительность считывается с соответствующих положений ручек переключателей на пульте управления).
10. Режим регистрации магнитных каналов.
11. Значение обратной связи (в станциях, имеющих два значения).
12. Начало регистрации (часы, минуты, секунды).

В процессе регистрации

1. Время и последовательность градуировки, величина подаваемых градуировочных импульсов и полярность их включения.
2. Время перехода на новую чувствительность.
3. Все операции, связанные со смещением пишущих бликов по шкале осциллографа (в какую сторону производится смещение и когда).
4. Время повторных градуировок и их величина.
5. Все операции, связанные с вынужденными остановками (отмечается время остановки записи и причины, например, замена источников питания, ремонт прибора, замена деталей и т. д.).
6. Конец регистрации.

и. Производят проявление фотолент, качество обработки должно быть высоким.

к. На осциллограммы записывают все основные данные из полевого журнала и делается временная разметка.

Характерные неисправности станции ГГ42

В табл. 9 и 10 приведен перечень основных неисправностей в станции типа ГГ42 с указанием их причин.

Характер неисправности (станция ГГ42-1)	Причины неисправности и мероприятия по ее устранению
1. Во всех магнитных каналах нет анодного тока	Не подается анодное напряжение к блоку магнитных датчиков
2. В одном из каналов отсутствует анодный ток (исходное состояние: питание исправно, тумблеры «Свет» и «ФЭУ» выключены)	Не подается напряжение накала, лампа 2П2П неисправна, утечка тока в цепи фотоумножителя. Лампу заменить, проверить утечки
3. Во всех магнитных каналах после наведения светового индекса в отверстие диафрагмы анодный ток не уменьшается до нуля (исходное состояние: все питание включено, тумблеры «Свет» и ФЭУ включены)	Разрядилась батарея питания фотоумножителей. Недостаточная яркость светового индекса. Проверить напряжение батарей ФЭУ и напряжение на осветительной лампе
4. Световой индекс периодически перескакивает с одной стороны отверстия на другую (анодный ток скачком изменяется от нуля до некоторого значения и обратно)	Сильно изменилось магнитное поле вблизи датчика, изменился режим питания. Проверить питание, световой индекс вывести магнитом точной компенсации в рабочее положение
5. Анодные токи во всех каналах приняли максимальное значение	Перегорела лампа осветителя
6. На всех магнитных каналах наблюдаются помехи (на электрических каналах помех нет)	Отсырел блок магнитных датчиков, плохие контакты в цепи питания осветителя. Прибор просушить, проверить цепь питания света
7. Помехи на одном магнитном канале	Утечки в цепи фотоумножителя, фотоумножитель «утомлен», плохие контакты в цепи накала ламп 2П2П. Прибор просушить, заменить ФЭУ, проверить контакты.
8. Все магнитные каналы «дрейфуют» в одну сторону (по анодному току)	Нестабильное питание осветителя. Питание заменить.

Характер неисправности (станция ГГ42-1)	Причины неисправности и мероприятия по ее устранению
9. «Дрейфует» один магнитный канал	Потеря фотоэлектронной эмиссии фотоумножителя, нестабильность питания накала лампы 2П2П. Заменить ФЭУ-2 и питание лампы
10. Наблюдаются вибрации стрелочного индикатора (или гальванометра) с собственной частотой датчика	Неправильно подобран конденсатор в цепи затухания магнитного канала. Подобрать конденсатор
11. При подаче градуировочных импульсов в начальный момент наблюдается «всплеск»	Неисправна цепь затухания. Подобрать конденсатор в цепи затухания
12. Опорный градуировочный ток не выводится на отметку «100» делений	Разрядился элемент, питающий градуировочную цепь
13. Нелинейность в магнитных каналах при включенных фильтрах КПК (при включении градуировочного импульса с различной полярностью отклонения стрелочного индикатора или регистрирующего гальванометра различными)	Неправильно подобрано смещение для лампы усилителя фильтров КПК, разрядилась батарея смещения (B_8), световой индекс больше нормы входит в отверстие диафрагмы ФЭУ (заперта лампа L_1 , L_2 или L_3) Подобрать смещение, подобрать номинальный рабочий ток в лампах L_4 , L_5 или L_6 . Проверить рабочий ток в лампах L_1 , L_2 или L_3 .
14. Гальванометры электрических каналов не компенсируются (измерительные линии цели)	Разрядился элемент в цепи компенсаторов постоянной э. д. с., большая э. д. с. между заземленными электродами. Заменить элемент, заменить один или оба электрода
15. Нет меток времени (нет вспышки лампы отметчика времени в осциллографе).	Неисправны контактные часы, реле. Проверить часовые контакты и контакты у реле
16. Взаимное влияние между магнитными каналами	Гальваническая связь между аккумуляторами в цепях накалов. Аккумуляторы протереть и изолировать друг от друга.

Характер неисправности (станция ГГ42-2)	Причины неисправности и мероприятия по ее устранению
1. Во всех магнитных каналах стрелка индикатора в цепи компенсации не отклоняется от нуля (исходное состояние: ручка «Компенсация грубо» — в нулевом положении, питание подключено)	Не подается анодное напряжение в блок магнитных датчиков
2. В магнитном канале стрелка индикатора, включенного в цепь компенсации, не реагирует при наведении светового индекса в отверстие диафрагмы фотоумножителя. Исходное состояние (питание подано, тумблеры «Свет» и ФЭУ включены)	Не подается напряжение накала анода; не работает лампа 2П2П; нарушена изоляция между электродами фотоумножителя. Проверить лампу и напряжение на лампе. Ликвидировать утечки на неле фотоумножителя.
3. При наведении световых индексов на отверстия диафрагм фотоумножителей на одну треть их ширины у <i>H</i> - и <i>D</i> -каналов и на половину — у <i>Z</i> -канала стрелка индикатора не доходит до нуля, оставаясь справа. (Исходное состояние: все питание включено)	Недостаточная яркость светового блика; Фотоумножитель малочувствителен. Проверить цепь питания осветителя, заменить фотоумножитель.
4. Внезапный срыв ищущих бликов со шкалы осциллографа (только у магнитных каналов)	Перегорела электрическая лампа осветителя

Характер остальных неисправностей у ГГ42-2 совпадает с описанными в п. п. 4, 6—16, указанных для ГГ42-1.

Настройка основных узлов станции ГГ42

Настройка магнитных датчиков вызывается следующими причинами: необходимостью перестройки на другое нормальное поле, необходимостью изменения чувствительности, например в случае неустойчивого равновесия магнитной системы в нормальном поле, необходимостью устранения провисания магнитной системы и, наконец, необходимостью полной настройки датчика в случае обрыва магнитной системы. Все перечисленное относится к датчикам с металлическими растяжками. Ремонт и настройка кварцевых магнитных систем рамочной конструкции вне специальной мастерской невозможны.

В случае обрыва магнитной системы, ее заменяют другой, имеющейся в запасном комплекте. Запасные системы заранее проверены на степень смещения центра тяжести относительно оси вращения и рассортированы на H , D и Z (наименьшее смещение центра тяжести имеет магнитная система, помеченная индексом Z).

Основание датчика закрепляют вертикально, желательно на поворотной стойке. Каретки с магнитами снимают. Плоскость основания датчика ориентируют в направлении магнитного меридиана. Магнитную систему приподнимают за один конец растяжки и, установив ее северными концами магнитов на север, зажимают конец растяжки в верхнем отверстии кронштейна с помощью цилиндрической втулочки и стопорного винта (рис. 29). При этом растяжка не должна быть перекручена, т. е. плоскость растяжки должна совпадать с плоскостью основания датчика; магнитная система должна занимать центральное положение. Другой конец растяжки пропускают через нижнее отверстие в кронштейне и прикрепляют к нему груз, весом 15—20 г (к концу растяжки можно припаять крючок для подвешивания груза). Чтобы груз не вращался вокруг растяжки, можно к нему прикрепить достаточно сильный магнит так, чтобы ось магнита находилась в плоскости растяжки. Груз, свободно подвешенный на растяжках, создает ей необходимое натяжение. Убедившись, что подвижная система занимает центральное положение и что растяжка полностью раскручена, нижний конец растяжки застопоривают. Проверку натяжения делают в горизонтальном положении растяжки.

Настраивают датчик на нормальное магнитное поле либо в кольцах Гельмгольца, в которых искусственно создается необходимое поле, либо непосредственно в тех условиях, где будет использоваться датчик. В последнем случае не требуется никаких приборов и приспособлений. Датчик устанавливают в нормальное положение и с помощью компенсационного магнита (перпендикулярного к оси подвижных магнитов), передвигаемого по кварцевой шине, устанавливают в нулевое положение: плоскость зеркала и плоскость основания датчика параллельны. Операцию настройки на нормальное поле производят только для H - и Z -датчиков (у D -датчика нормальное поле равно нулю).

Чувствительность датчика устанавливается с помощью другого магнита, ось которого совпадает с осями подвижных магнитов. Магнит чувствительности передвигается с помощью каретки на другом конце кварцевой шины по отношению к каретке с компенсирующим магнитом. Если настройка датчиков производится непосредственно в блоке магнитных датчиков, то чувстви-

тельность их можно определять с помощью градуировочного устройства; из питающих напряжений необходимо включить только напряжение на осветитель. По величине подаваемых градуировочных импульсов и отклонению световых бликов в плоскости диафрагм определяется цена деления датчиков. В пересчете на метровый оптический рычаг цена деления датчиков должна составлять $3-5 \frac{\text{гамма}}{\text{мм}}$ при условии их хорошей устой-

чивости. Необходимо иметь в виду, что при сближении подвижных магнитов и магнита чувствительности разноименными полюсами цена деления будет увеличиваться; при сближении одноименных полюсов — уменьшаться. При настройке на заданную чувствительность вследствие неидеальной соосности магнитов будет нарушаться настройка датчика на нормальное поле. Поэтому обе эти настройки проводятся одновременно путем последовательного приближения.

Точно такая же настройка проводится в случае, если необходимо изменить азимут измерений. В этом случае перестраивают только *H*- и *D*-датчики, сохраняя прежнюю чувствительность.

Настройка оптико-механической части станции. Основные требования к оптике сформулированы в первом параграфе этой главы.

Нарушение оптики может произойти в результате перегорания осветительной лампы или механической расстройки (например во время транспортировки).

При замене необходимо выбрать лампу без дефектов в стеклянном баллоне и с симметрично расположенным волоском. Совмещают нить накала с оптическим центром блока магнитных датчиков. При правильном совмещении нити накала изображения светящихся щелевых диафрагм проходят через диаметры всех трех объективов: на белом экране, поднесенном к объективу, наблюдается яркая диаметральная полоска на относительно менее освещенном круговом поле. Необходимые размеры световых индексов, их четкость и однородность достигаются взаимным перемещением оправ конденсатора, щелевой диафрагмы и объектива. Указанные детали легко перемещаются как вдоль оси, так и вокруг ее. Параллельность светового индекса и вертикальной кромки отверстия диафрагмы фотоумножителя достигается поворотом конденсатора вместе со щелевой диафрагмой вокруг оси.

Кожухи фотоумножителей регулируются по высоте так, чтобы отверстия диафрагм вырезали наиболее однородную часть световых индексов. Все настраиваемые детали должны быть надежно закреплены стопорными винтами.

Диаметральные риски, нанесенные на корпусах датчиков для H - и D -датчиков должны быть установлены вертикально, для Z -датчика — в направлении оптической оси $C — Ю$. При настройке оптики ход лучей в плане должен совпадать с рисками $C — Ю$ и $B — З$ не хуже $0,5^\circ$.

Нулевые положения датчиков и фиксация их относительно корпуса прибора, в котором размещены датчики, определяются с помощью колец Гельмгольца. Кольца должны быть достаточно больших размеров, чтобы их центр мог быть совмещен с центром каждого датчика. Ось колец в каждом случае ориентируется вдоль по направлению предполагаемых нулевых положений подвижных магнитов датчиков: для H - и Z -каналов в направлении риски $B — З$ на крышке блока магнитных датчиков, для D -канала — в направлении риски $C — Ю$. В кольцах Гельмгольца создается достаточно сильное поле, которое ориентирует подвижные магниты датчика в направлении оси колец. Кожух фотоумножителя по направляющей передвигается до тех пор, пока на выходе магнитного канала (наблюдение ведется по стрелочному индикатору на пульте управления) не будет создан оптимальный рабочий ток.

Круглый уровень, установленный на корпусе осветителя, сверяют с контрольным, который лучше всего устанавливать на дне блока магнитных датчиков.

Настройка основных электрических узлов. Схема фотоэлектрического преобразования. Предполагается, что схема собрана правильно, режимы питания и режимы работы ламп соответствуют данным, приведенным в табл. 4 и 6.

Настройка схемы заключается в том, чтобы правильно выбрать полярность включения катушек обратной связи и затухания, а также обеспечить необходимый режим демпфирования.

Необходимо включить станцию; если световой индекс в настраиваемом канале не имеет устойчивого равновесия ни с какой стороны отверстия диафрагмы, то меняют полярность одной из обмоток: либо обмотки обратной связи, либо обмотки затухания. Если выбрано устойчивое равновесие и если возникнет необходимость перевести световой индекс на другую сторону отверстия, то меняют полярность обеих обмоток. В процессе эксплуатации аппаратуры иногда возникает необходимость изменить режим демпфирования того или иного магнитного канала. Наиболее доступным регулировочным параметром в этом случае является конденсатор в цепи демпфирования. Подбор конденсатора удобнее всего осуществить с помощью магазина емкостей.

Фильтр КПК. Постоянная времени фильтров КПК в магнитных каналах имеет одно фиксированное значение, но если

есть необходимость, может быть изменена в любую сторону. Изменение постоянной фильтра целесообразнее делать путем замены сопротивлений в *RC*-звеньях.

В процессе эксплуатации необходимо осуществлять регулировку усилителя фильтров, которая состоит в подборе необходимого смещения на сетку лампы (у станции ГГ42-1) или на обе лампы (у станции ГГ42-2). В первом случае рабочий ток контролируется миллиамперметром, включенным в анодную цепь лампы.

В станции ГГ42-2 к лампам усилителя балансного типа предъявляются весьма жесткие требования в отношении их идентичности как по величине анодного тока, так и по крутизне. Испытание ламп должно быть произведено или на специальном испытательном приборе (ИЛ) или на эталонировочном пульте, который имеется в комплекте микровариационной станции. Из набора испытанных ламп группируются наиболее идентичные пары, которые и используются в балансном усилителе. Регулировка этих усилителей состоит в подборе одинакового смещения на обе лампы, чтобы рабочие токи этих ламп соответствовали данным табл. 6.

При подборе рабочих токов варьируют также сопротивлениями, осуществляющими обратную отрицательную связь (R_{43} , R_{46} , R_{55} и R_{58}) в *H*-канале (см. электрическую схему рис. 33).

Система автокомпенсации дрейфа нуля. Нарушение первоначальной настройки автокомпенсации может произойти в результате изменения чувствительности или других параметров у элементов, входящих в магнитный канал. Поэтому система автокомпенсации требует регулярной ее подстройки. В станции ГГ42-1 система автокомпенсации дрейфа нуля охватывает три основных источника питания, в станции ГГ42-2 — два. Методика подбора автокомпенсации по любому источнику напряжения одинакова и заключается в том, чтобы подобрать необходимые сопротивления в цепи автокомпенсации, выбирая остальные параметры этой цепи произвольно (см. ч. I, гл. 2, условия (56)).

Метод подбора заключается в следующем (рис. 37). Вместо подбираемого сопротивления R^* , обозначенного пунктиром, подключают магазин сопротивлений *M*. Собирают схему, с помощью которой можно изменять напряжение источника питания. В общем случае напряжение можно изменять с помощью потенциометра R_1 , как показано на рис. 37.

В низкоомных цепях питания напряжение можно менять реостатом, включенным последовательно с источником питания. Движок потенциометра или реостата устанавливают в положение

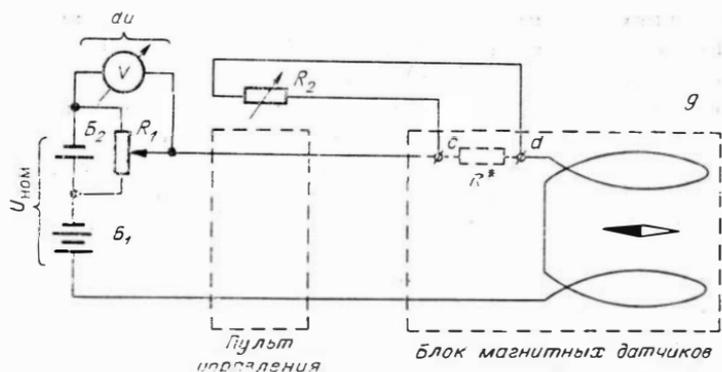


Рис. 37. Принципиальная схема для подбора сопротивления в цепи автокомпенсации.

ние, соответствующее номинальному значению напряжения; устанавливают нормальный рабочий режим в магнитном канале. Изменяют напряжение па допустимую величину (скачком, плавно или ступенчатым образом) и наблюдают за характером отклонения стрелочного индикатора. Если стрелка отклоняется в ту же сторону, что и при выключенной цепи автокомпенсации, значит сопротивление R — велико, если в обратную сторону, то мало. Путем последовательных приближений добиваются наименьшего отклонения стрелки индикатора в пределах допустимых изменений источника питания. В процессе подбора сопротивления R каждый раз необходимо корректировать рабочий режим в магнитном канале путем компенсации того поля, которое создается обмоткой автокомпенсации любым имеющимся способом (магнитом плавной компенсации, ручкой «Компенсация точно» или градуировочным устройством).

С особой тщательностью следует подбирать автокомпенсационную цепь для источника света. В станции ГГ42-2 для регулярного контроля этой цепи используется ступенчатый реостат «Напр. накала». Подбор сопротивлений для станции ГГ42-2 следует начинать сначала при повышенной глубине обратной связи (при замкнутом разьеме Π_1), затем — при пониженном.

Результаты испытаний и возможность применения аппаратуры в геофизических исследованиях

Микровариационная аппаратура типа ГГ42 предназначена в основном для магнитотеллурических исследований, осуществляемых как в стационарных (в постоянных и временных обсерваториях), так и в экспедиционных условиях. Однако не ис-

ключены и другие возможности применения аппаратуры: это различного рода магнитоэлектрические измерения, на которых мы не будем останавливаться.

Начиная с 1961 г. станция ГГ42 прошла всесторонние испытания и при этом постоянно совершенствовалась. Испытания проводились в обсерваториях и непосредственно в полевых производственных экспедициях. Окончательные испытания тех вариантов аппаратуры, которые описаны в настоящей работе, подтвердили их достаточно высокие метрологические и эксплуатационные характеристики. Перечислим основные из них.

а. Наличие пяти измерительных каналов (H , D , Z , E_1 , E_2) позволяет получать полную информацию о характере источников вариаций и о геоэлектрических свойствах Земли.

б. Достигнута высокая чувствительность магнитных измерительных каналов (до $2 \div 5 \cdot 10^{-8}$ э).

в. Доказана возможность измерения магнитных вариаций в весьма широком диапазоне (с периодами от долей секунды до суток).

г. Результаты измерений, полученные в крайне неблагоприятных метрологических условиях (при высокой влажности, во время дождя и мокрого снега, зимой при температуре до -30°C и т. п.), по качеству мало уступают тем материалам, которые получены в нормальных условиях, что указывает на достаточно высокую стабильность и безотказность работы аппаратуры.

д. Достигнута высокая производительность измерений за счет сокращения времени на установку и настройку аппаратуры, а также вследствие повышения надежности аппаратуры.

е. Подтверждена высокая помехозащищенность аппаратуры от механических воздействий (ветровых, сейсмических и других колебаний), что упростило методику измерений.

ж. Показана возможность применения для исследований в труднодоступных районах благодаря значительному снижению мощности питания и веса аппаратуры.

Метод МТП. В методе МТП аппаратура типа ГГ42 может применяться в автомобильном и переносном варианте. Последний вариант заслуживает особого внимания, так как для этого имеются все предпосылки. Отсутствие достаточно портативных и экономичных гальванометрических осциллографов является пока основной трудностью при создании переносного варианта аппаратуры для метода МТП.

При использовании аппаратуры типа ГГ42 повышается производительность метода; которая приближается к производительности метода теллурических токов. По количеству получаемой информации метод МТП значительно превосходит метод ТТ [9].

Наличие в аппаратуре измерительного Z-канала позволяет получать ценную дополнительную информацию.

Методика измерений с помощью станции ГГ42 в методе МТЗ мало отличается от известной методики [9]. Исключением из общепринятых правил является то, что в безветренную погоду блок магнитных датчиков можно устанавливать непосредственно на поверхности земли. Упрощаются также некоторые регламентные работы во время эксплуатации аппаратуры.

Пример участка осциллограммы, наиболее типичный для метода МТЗ приведен на рис. 38. Данный отрезок записи иллюстрирует также один из самых распространенных типов возмущений естественного электромагнитного поля — вариации типа КПК.

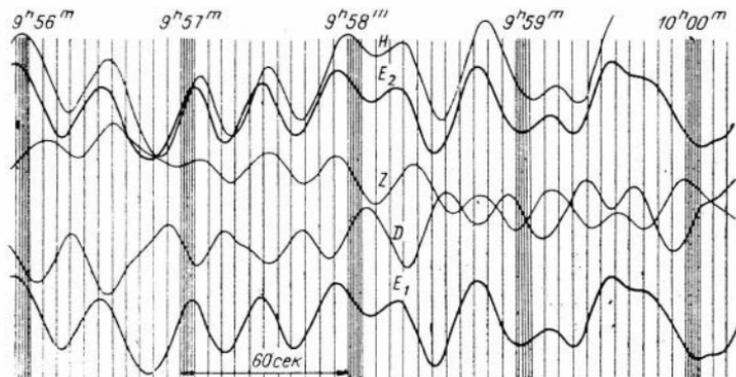


Рис. 38. Пример участка осциллограммы с записью пяти компонент вариаций типа КПК.

рирует также один из самых распространенных типов возмущений естественного электромагнитного поля — вариации типа КПК.

Метод магнитотеллурического зондирования с применением аппаратуры ГГ42 может осуществляться в стационарных и в экспедиционных условиях. Метод МТЗ весьма трудоемок, если он использует широкий спектр вариаций. Поэтому в полевых условиях этим методом работают, как правило, в помещениях. Пункты для проведения таких наблюдений выбираются с учетом электромагнитных помех от дальних источников и возможных местных помех. Провода для электрических каналов тщательно защищаются от механических воздействий. Блок магнитных датчиков укрывается в яме, при этом предусматривается возможность свободного доступа к нему во время настройки и других операций. Вся остальная аппаратура устанавливается в помещении. Продолжительность регистрации, чувствительность измерительных каналов и скорость лен-

топротяжного механизма осциллографа выбираются в соответствии с конкретными требованиями. Во время продолжительной регистрации не рекомендуется делать перерывы в работе станции, если это не связано с нарушением ее работы.

Другие методы. Микровариационная станция ГГ42 может успешно применяться в исследованиях, где используются только магнитные вариации. Известно, что влияние электромагнитных помех больше всего сказывается на электрических измерительных каналах, поэтому в некоторых случаях магнитотеллурические исследования можно заменить магнитовариационными. Одним из таких методов является метод магнитовариационной разведки, осуществляемый в варианте зондирования или профилирования. В варианте МВЗ работа практически не отличается от метода МТЗ, за исключением того, что здесь не требуется измерять электрические поля.

Весьма интересные результаты получаются при использовании магнитных вариаций в варианте профилирования (МВР) в районах с резкими нарушениями геологических структур. Здесь используется в основном тот же диапазон вариаций, что и в МТП. Для осуществления этого способа необходимы две станции: базисная и полевая (по аналогии с методом ТТ). Синхронность измеряемых вариаций обеспечивается с высокой точностью с помощью часов МХ-6 (контактных морских хронометров). Время синхронной записи двух станций устанавливается либо по радию, либо по заранее намеченному графику.

Рассмотренный вариант магнитного профилирования может быть применен в различных геофизических задачах: в структурных, рудных и других исследованиях.

Применение аппаратуры в обсерваториях. Технические данные станции ГГ42 позволяют применять ее на обсерваториях для регистрации вариаций коротких, средних и длинных периодов.

Главной особенностью регистрации электромагнитных пульсаций и других типов вариаций в обсерваториях является большая продолжительность непрерывной регистрации. В этих условиях особенно велики требования к стабильности всех узлов станции и к величине потребляемой ею мощности. Как известно, походный комплект питания рассчитан на продолжительность непрерывной работы станции в течение 120—150 часов.

В обсерватории есть возможность применить более емкие батареи и аккумуляторы, увеличив тем самым продолжительность регистрации без замены питания до 500 часов. Большая продолжительность работы лимитируется также сроком службы электронных приборов, который составляет в среднем для электрон-

ных ламп и фотоумножителей 500—1000 часов. Возможны в процессе регистрации и другие нарушения в работе, связанные главным образом с «утомлением» фотоумножителей. Для устранения возможных нарушений и профилактики станции неизбежны кратковременные перерывы записи. Поэтому целесообразно в особо ответственных случаях устанавливать параллельно две станции с записью на одну или на две отдельные ленты.

Работа станции без наблюдателя (что характерно для обсерватории) возможна только при использовании фильтра. Имеющийся в станции фильтр КПК гарантирует работу станции без зашкаливания в течение нескольких часов. Для более длительной регистрации необходимо предусмотреть набор пассивных фильтров с различной постоянной времени. Вследствие большого затухания, вносимого пассивными фильтрами, в обсерваториях желательнее использовать в качестве регистраторов зеркальные гальванометры с высокой чувствительностью. Блок датчиков, как и при полевой регистрации, устанавливают вне помещения в земляной траншее. Траншеею более тщательно, чем в разведке, изолируют от колебаний температуры и влаги. Регистрирующую часть с пультом управления устанавливают в помещении, обеспечивающем их нормальную работу. При выносном блоке датчиков требования к помещению в смысле его немагнитности отпадают, т. е. оно может быть любым.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТУРЫ

Определение параметров, характеризующих переходные и частотные свойства магнитного канала

Частотные и переходные характеристики магнитного измерительного канала определяются тремя параметрами: частотой собственных колебаний измерительной системы f_0 , коэффициентом затухания h и постоянной времени фильтров верхних частот $\tau = RC$.

Частота собственных колебаний измерительной системы зависит от параметров датчика, глубины обратной отрицательной связи и в общем случае — от параметров регистрирующего гальванометра. Чаще всего гальванометр выбирается так, чтобы его влиянием можно было пренебречь. Для того, чтобы определить собственную частоту датчика, необходимо его изолировать от влияния схемы микровариометра, т. е. отключить катушку обратной связи и демпфирования (у станции ГГ42-1 отпаять один из проводов, подходящий к катушке, у станции ГГ42-2 разъединить штепсельный контакт около катушки). Если собственная частота датчика не слишком велика (не более 2—3 гц), то число собственных колебаний за определенный интервал времени можно подсчитать непосредственно по стрелочному индикатору микровариационной станции. Возмущающий импульс задают либо от градуировочного устройства, либо механически-

ким толчком. Промежуток времени, в течение которого ведется счет колебаний, отмечают по секундомеру.

Если собственная частота высока настолько, что визуальный подсчет числа колебаний становится невозможным, производят их осциллографическую запись. При отсутствии обратной связи максимально загружают пишущий гальванометр, скорость движения осциллограммы выбирают такой, чтобы два соседних колебания разрешались отчетливо. Для отметок времени используют контактные часы с секундным или пятисекундным контактом (например, АЧХ). Наибольшее практическое значение имеет собственная частота всего измерительного канала. Для магнитных каналов станции ГГ42-1 определяется одно значение собственной частоты, для станции ГГ42-2 два значения (для двух значений коэффициента обратной связи). Собственную частоту всего канала определяют только осциллографическим способом: либо визуально по шкале осциллографа, либо путем записи колебаний. При определении f_0 обмотка демпфирования должна быть все время отключена.

Другой способ определения частоты собственных колебаний — резонансный, для осуществления которого необходимо иметь генератор низких частот. Ток генератора пропускают через катушку, помещаемую около датчика; вращая плавно частоту генератора, фиксируют по шкале осциллографа момент наступления резонанса. Частота, при которой происходит резонанс, и будет собственной частотой измерительного канала.

Непосредственное определение коэффициента затухания для магнитного канала весьма затруднено, если учесть, что магнитный канал почти всегда работает в апериодическом режиме ($h \geq \omega_0$). Можно для определения h использовать косвенный способ. Осциллографическим способом записывают переходный процесс от ступенчатого импульса. Запись производят на пониженной чувствительности и вдали от промышленных помех (с целью уменьшения искажений переходного процесса). Записывают на большой скорости лентопротяжного механизма ($20 \div 50 \frac{\text{м.м}}{\text{сек}}$). Для данной собственной частоты f_0 , которая должна быть заранее известна, находят из табл. I (см. приложение) наиболее совпадающие с экспериментальной кривой дискретные значения теоретической переходной функции. Значение коэффициента затухания берется против той строки, значения которой наиболее точно ложатся на экспериментальную переходную функцию.

Точно также можно использовать расчетные частотные характеристики для магнитного канала (без фильтров КПК), ко-

торы приведены в табл. II. В этом случае необходимо снять практическую частотную характеристику магнитного канала и путем сравнения ее с расчетными числовыми данными — определить, таким образом, коэффициент h . Последний способ более трудоемок, чем первый, но он оказывается наиболее точным при определении h в том случае, если магнитный канал работает в колебательном режиме.

Постоянную фильтра можно определить путем непосредственного измерения входящих в него сопротивлений и емкостей. Однако без учета влияния остальной схемы магнитного канала такое определение будет неточным. Для определения $\tau = RC$ можно, как и в предыдущем случае при определении h , использовать косвенный способ. В исследуемом магнитном канале удаляют фотоумножитель, включают питание и фильтр. После установления переходных процессов в фильтре включают на вход усилителя фотопреобразователя ступенчатое напряжение (например, от батарейки карманного фонаря). Переходный процесс записывают на осциллографе. Для полученной кривой из таблицы IV находят наиболее совпадающие дискретные значения теоретической переходной функции. Соответствующее выбранной строке значение τ и будет искомой величиной. При этом необходимо иметь в виду, что вследствие утечек в конденсаторах установившееся напряжение на выходе фильтра после подачи на вход скачка напряжения может оказаться не равным нулю. В этом случае отсчитывать скачок напряжения следует от уровня установившегося напряжения.

Способы определения цены деления измерительных каналов

При градуировании магнитометрической и магнитотеллурической аппаратуры, работающей в области низких и инфранизких частот ($1-0 \text{ гц}$) используют в основном ступенчатое включение постоянных сигналов: постоянного тока — для магнитных измерительных каналов, и постоянного напряжения — для теллурических каналов. Технически этот способ осуществляется весьма просто и, кроме того, постоянный ток измеряется с высокой точностью. Однако отклонения, получаемые на выходе измерительных каналов, определять уже не так просто, поскольку на градуируемую систему действуют одновременно другие поля (естественные вариации, промышленные помехи), а также вследствие искажения первоначального импульса за счет переходных процессов.

Наиболее точная градуировка данным способом получается для измерительных систем с малой инерционностью и не имеющих электрических фильтров. Однако и для таких систем точность определения цены деления будет снижаться, если их градуирование производить на фоне быстроизменяющихся внешних полей. В случае, если внешнее поле изменяется достаточно плавно, участки записи до и после включения градуировочного импульса переводят на прозрачную бумагу и затем совмещают до наилучшего совпадения прерванной кривой. Величина смещения и будет представлять выходной градуировочный сигнал. Этот способ часто применяют при обработке магнитотеллурических осциллограмм.

Градуирование измерительных каналов, имеющих сложную переходную характеристику, представляет известные методические трудности.

Для градуирования магнитных каналов с включенными фильтрами верхних частот (КПЧ) можно использовать следующую методику. Градуировать нужно обязательно в моменты, когда вариации внешнего поля изменяются достаточно медленно (на шкале осциллографа блики не должны смещаться быстрее 1 мм/сек). Градуировочное отклонение на шкале осциллографа должно быть не менее 100 мм при ширине бумаги 200 мм . Скорость записи перед включением градуировочного импульса увеличивают для того, чтобы отчетливо зарегистрировать положение максимума отклонения. Промежуток времени между двумя соседними градуировочными включениями выбирается не менее, чем постоянная времени фильтра. На осциллограмме измеряют амплитуду градуировочного отклонения от нулевого уровня до максимального значения. Зная параметры магнитного канала f_0 , h и τ , находят соответствующее этим параметрам максимальное теоретическое значение переходной функции, которое всегда меньше единицы (при $h \gg \omega_0$). Для того чтобы получить истинное градуировочное отклонение, необходимо амплитуду практического градуировочного импульса разделить на табличное значение $k(\text{—})_{\text{max}}$. Значения $k(\text{—})_{\text{max}}$ даны в приложении в виде таблиц (VII).

Более универсальным способом градуирования микровариационной аппаратуры по сравнению со статическим способом является градуирование с помощью гармонических импульсов. В одном из вариантов станции ГГ42-1 был осуществлен механический градуировочный генератор низкой частоты ($0,3\text{—}0,7\text{ гц}$). Градуировочный генератор подключался к градуировочной обмотке магнитного канала. В цепь генератора и градуировочной обмотки включался контрольный гальванометр (один из свобод-

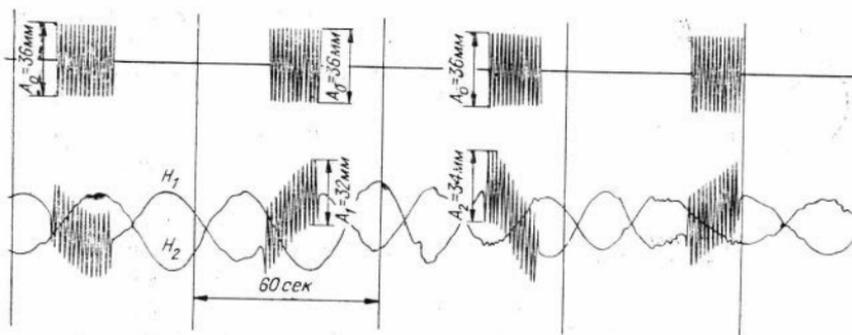


Рис. 39. Пример градуировки магнитного канала синусоидальным током
ных гальванометров осциллографа). Пример градуировки с помощью синусоидального генератора показан на рис. 39.

Цена деления магнитного канала в этом случае подсчитывается по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{A_0 c_0 g}{A_1 k(\omega)},$$

где A_0 — амплитуда отклонений контрольного гальванометра на осциллограмме; A — амплитуда отклонения регистрирующего гальванометра; c_0 — чувствительность контрольного гальванометра, $\frac{\text{мм}}{a}$; $k\omega$ — частотная характеристика градуируемого канала; g — постоянная градуировочной катушки.

Если частота генератора фиксирована ($\omega = \text{const}$), то $\frac{c_0 g}{k(\omega)} = K \left[\frac{\text{з.а.м.м.а}}{\text{м.м.}} \right]$ — величина постоянная. Как видно из рис. 37, наличие внешнего поля и помех несущественно влияет на точность градуировки. Этот способ может быть применен к любой измерительной системе, у которой известна частотная характеристика.

Эталонирование измерительных каналов

Эталонировкой называют периодическую поверку градуировочного устройства измерительной аппаратуры. Эталонировочное приспособление по существу и является внешним градуировочным устройством, состоящим из контрольно-измерительных приборов достаточно высокой точности.

Одна из возможных схем для эталонирования магнитных и теллурических каналов приведена на рис. 40.

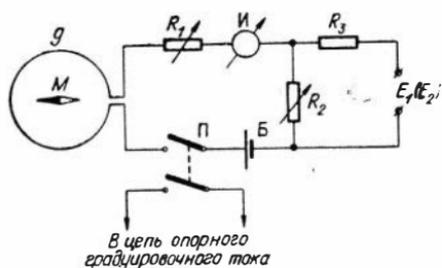


Рис. 40. Принципиальная схема для эталонирования измерительных каналов вариационной аппаратуры.

При работе набором градуировочных магнитных импульсов подсчитываются эталонные значения токов ($I_3 = \frac{H_{1p}}{g}$, g — постоянная эталонировочных колец). Величина тока регулируется переменным сопротивлением R_1 . Величина эталонировочных импульсов напряжения для E -каналов устанавливается с помощью магазина сопротивлений R_2 . При этом должно быть соблюдено условие $\frac{R_2}{R_1} < 0,001$ и ток в цепи Б — И — R_1 — R_2 — g должен поддерживаться одинаковым при изменениях R_2 и R_3 (R_3 — эквивалент сопротивления заземления порядка 500 ом). Эталонировка магнитных и теллурических каналов по способу осциллографирования производится следующим образом: поочередно включаются разнополярные импульсы от эталонировочного и градуировочного устройств. Соответствующие отклонения, полученные на осциллограмме, осредняются, сравниваются и вводятся необходимые поправки. Этот способ и рекомендуется обычно в магнитотеллурических измерениях.

Можно воспользоваться другим способом, более простым и не требующим осциллографической записи. В этом случае импульсы от эталонировочного и градуировочного устройств включаются одновременно навстречу друг другу. На схеме включение производится двоянным выключателем П; при этом один из выключателей должен быть введен в разрыв цепи опорного градуировочного тока станции ГГ42 (отпаивается один из проводов сопротивления R_{60} на схеме станции ГГ42-1 или у R_{75} на схеме ГГ42-2) другой — в разрыв эталонировочной цепи. При эталонировании магнитных каналов изменением сопротивления R_1 добиваются полной компенсации градуировочного и эталонировочного импульсов в момент замыкания и размыкания выключателя.

Центр датчика поверяемого магнитного канала совмещается с центром эталонировочных колец Гельмгольца (см. рис. 32). Последовательно с обмоткой колец включаются: гальванический элемент Б, два магазина сопротивлений R_1 , R_2 класса 0,1 и миллиамперметр класса 0,5, например, М-82.

В соответствии с имеющимся в градуировочном устройстве набором магнитных импульсов подсчитываются эталонные значения токов ($I_3 = \frac{H_{1p}}{g}$, g — постоянная эталонировочных колец).

Величина тока регулируется переменным сопротивлением R_1 . Величина эталонировочных импульсов напряжения для E -каналов устанавливается с помощью магазина сопротивлений R_2 . При этом должно быть соблюдено условие $\frac{R_2}{R_1} < 0,001$ и ток в цепи Б — И — R_1 — R_2 — g должен поддерживаться одинаковым при изменениях R_2 и R_3 (R_3 — эквивалент сопротивления заземления порядка 500 ом). Эталонировка магнитных и теллурических каналов по способу осциллографирования производится следующим образом: поочередно включаются разнополярные импульсы от эталонировочного и градуировочного устройств. Соответствующие отклонения, полученные на осциллограмме, осредняются, сравниваются и вводятся необходимые поправки. Этот способ и рекомендуется обычно в магнитотеллурических измерениях.

Можно воспользоваться другим способом, более простым и не требующим осциллографической записи. В этом случае импульсы от эталонировочного и градуировочного устройств включаются одновременно навстречу друг другу. На схеме включение производится двоянным выключателем П; при этом один из выключателей должен быть введен в разрыв цепи опорного градуировочного тока станции ГГ42 (отпаивается один из проводов сопротивления R_{60} на схеме станции ГГ42-1 или у R_{75} на схеме ГГ42-2) другой — в разрыв эталонировочной цепи. При эталонировании магнитных каналов изменением сопротивления R_1 добиваются полной компенсации градуировочного и эталонировочного импульсов в момент замыкания и размыкания выключателя.

Поправка для магнитных градуировочных импульсов подсчитывается следующим образом:

$$\Delta H = (I - I_3) g,$$

где I — ток в эталонировочных кольцах, соответствующий полной компенсации; I_3 — вычисленный ток, который соответствует точному значению эталонируемого импульса. Поправка для теллурических каналов считается непосредственно с магазина сопротивления R_2 , если ток в эталонировочной цепи поддерживать равным 1 ма.

Эталонировочное устройство, прилагаемое в комплект станции ГГ42-2, принципиально не отличается от рассмотренной выше схемы. В случае эталонирования с помощью этого устройства способом компенсации последовательно с обмоткой эталонировочного кольца включают дополнительное переменное сопротивление (или магазин сопротивлений). Эталонировочное кольцо крепится к датчику поверяемого магнитного канала винтом и поэтому отпадает необходимость точной его юстировки. Во время эталонирования ведется постоянный контроль тока по стрелочным индикаторам на пульте управления станции и на эталонировочном пульте. В остальном методика работы с этим устройством не отличается от изложенной выше.

Поскольку градуировочное устройство является общим для всех каналов, то нет необходимости делать детальную поверку всех измерительных каналов во всех положениях переключателей амплитуды градуировочных импульсов. Достаточно произвести эталонировку одного магнитного и одного теллурического каналов, а остальных каналов — лишь при каком-либо одном значении градуировочного импульса.

Практические частотные характеристики магнитных каналов

Частотные свойства магнитных каналов определялись с помощью генератора НГК-3, ток которого пропускался через катушку, помещаемую около исследуемого датчика.

Влияние промышленных и естественных магнитных полей уменьшалось тем, что измерения проводились на пониженной чувствительности магнитного канала.

Выходные сигналы исследуемого канала записывались на фоторегистраторе, на котором отмечались также опорные сигналы генератора с помощью вибратора с собственной частотой колебаний около 30 гц. Собственная частота исследуемых магнитных каналов была около 2 гц.

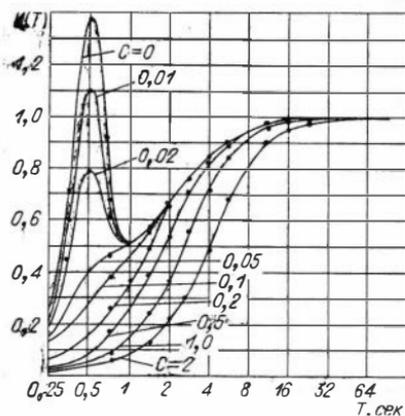


Рис. 41. Практические частотные характеристики магнитного канала (1 звена микровариометра).

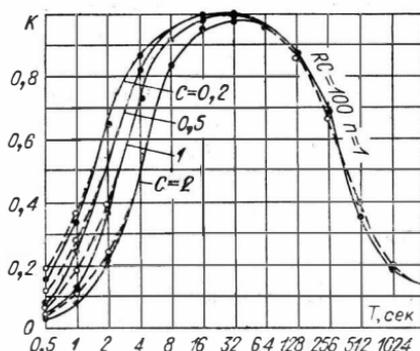


Рис. 42. Частотные характеристики магнитного канала с включенным фильтром RC.

Частотные характеристики снимались в зависимости от величины затухания, которая изменялась с помощью конденсатора. На рис. 41 приведены экспериментальные амплитудно-частотные характеристики магнитного канала в режиме записи суммарных вариаций (фильтр КПК отключен). По оси абсцисс отложены периоды колебаний в секундах.

По характеристикам можно найти наиболее подходящий режим для данных условий работы микровариометра — от колебательного до апериодического.

Резонансные характеристики при $C=0$; 0,01 и 0,02 мкф могут быть использованы для выделения коротко-периодических колебаний типа «жемчужин», периоды которых, как известно, лежат в интервале ($T=0,5 - 2$ сек).

Для регистрации обычных КПК ($T=10-100$ сек) целесообразнее использовать критический режим — кривая $C=0,2$ мкф.

Кривая наиболее острого резонанса ($C=0$) соответствует случаю, когда электрическая цепь затухания отключена; затухание микровариометра обусловлено лишь трением в самой магнитной системе.

Из семейства кривых видно, что путем подбора надлежащего затухания возможна уверенная регистрация процессов с частотами до 3 гц; потеря чувствительности при этом не превышает 50%. Заметим, что частотные характеристики снимались с датчиком, собственная частота которого 1 гц.

На рис. 42 приведены полные частотные характеристики (фильтр КПК включен). Кривые сняты для критического

($C=0,2$) и некоторых случаях аperiodического режима. Фильтр низких частот (датчик + фотопреобразователь) и фильтр КПК образуют полосовой фильтр. Частотные характеристики этих фильтров, как видно из рисунка, почти не перекрываются, поэтому левые ветви кривых совпадают. Диапазон КПК в полосе 10—100 сек искажен не более 8—10%; все другие частоты вне этой полосы значительно ослаблены. Пунктирными линиями нанесены теоретические кривые для тех же параметров. Практические и теоретические характеристики хорошо согласуются между собой. Небольшое расхождение имеется лишь в левых ветвях, что обусловлено влиянием согласующего фильтра, который не был учтен при расчетах теоретических кривых.

Значительный интерес представляло изучение стабильности частотных характеристик в зависимости от изменения параметров фотопреобразователя. Этот интерес вызывался двумя причинами: следует ли периодически повторять снятие характеристик в процессе эксплуатации прибора и возможно ли градуирование магнитного канала фиксированной синусоидой? Как известно, процедура снятия частотных характеристик довольно трудоемкая, требует громоздкой аппаратуры и поэтому в полевых условиях не всегда осуществима. При изучении стабильности частотных характеристик различные параметры схемы изменялись так, что чувствительность магнитного канала без обратной связи падала в 2 раза: при этом изменялось входное сопротивление усилителя, уменьшался световой поток путем перекрытия диафрагмы фотоумножителя, выбирались фотоумножители низкой чувствительности.

Результаты приведены на рис. 43, где кривая 1 снята при оптимальных параметрах схемы, а 2 — при чувствительности, уменьшенной в 2 раза. Кривые 1 и 2 различаются очень незначительно. Ощутимое различие (кривая 3) наблюдается при очень резком изменении чувствительности — примерно в 5 раз меньше оптимальной. Но такой случай в практике едва ли может иметь место, так как разброс параметров для ламп, фотоумножителей и других элементов схемы в худшем случае может достигать 100%.

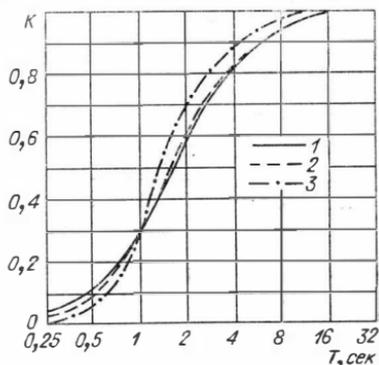


Рис. 43. Влияние изменения параметров магнитного канала на его частотную характеристику.

Амплитудные характеристики магнитных каналов

При теоретическом рассмотрении мы везде полагали наличие пропорциональности между отклонениями датчика и установившимися отклонениями регистрирующего прибора. Опытным путем можно установить, в каких пределах существует эта пропорциональность. На рис. 44 показаны амплитудные характеристики магнитного канала, где по оси абсцисс отложены величины подаваемых на вход магнитных полей в гаммах, по оси ординат — изменения анодного тока в миллиамперах. За начало отсчета принят оптимальный рабочий ток усилителя.

Амплитудные характеристики сняты в диапазоне 200 γ ($\pm 100 \gamma$). График 1 соответствует оптимальным параметрам в магнитном канале. Практически можно считать, что характеристика линейна во всем рабочем диапазоне вплоть до зашкаливания. Некоторое отступление от линейности можно объяснить скорее неточностью измерения отклонений вследствие влияния помех.

Показана высокая стабильность линейности. Графики 2 и 3 сняты при различных дефектах оптической системы. В случае 2 на пути светового луча помещалась сетка из проволоки диаметром 0,5 мм и размером ячейки 2 мм². В случае 3 на часть поверхности объектива наносилось тушью пятно. В обоих случаях

линейность почти не нарушилась. Произошло лишь некоторое уменьшение чувствительности: наклон характеристики стал меньше.

Эти эксперименты подтверждают высокие качества проекционных осветительных систем, которые малочувствительны к случайным загрязнениям оптики, попаданию пыли и влаги, что важно в полевых условиях.

Амплитудные характеристики магнитных каналов определяют с точностью до частотных искажений (которые имеют место лишь вблизи собственных частот магнитных каналов) степень идентичности двух или более измерительных каналов. Можно утверждать, что если ам-

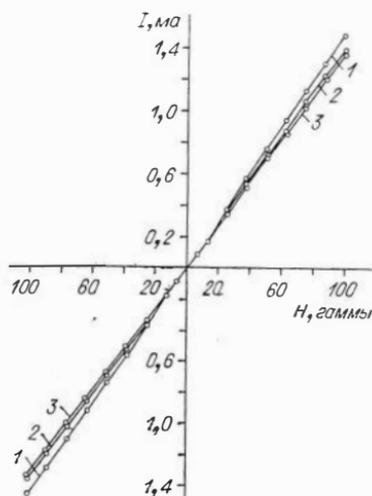


Рис. 44. Практические амплитудные характеристики магнитного канала.

амплитудные характеристики двух приборов линейны, то эти приборы идентичны между собой. На рис. 45 показана запись на идентичность двух одинаково ориентированных магнитных каналов. Параметры их примерно совпадают. Сигналы на оба канала подавались от генератора. На запись наложены небольшие промышленные помехи.

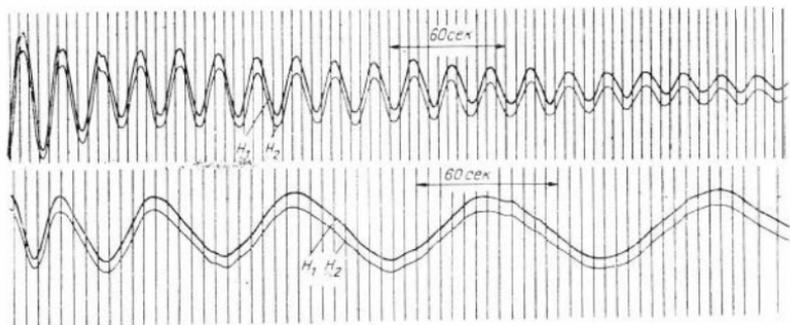


Рис. 45. Запись двух одинаково ориентированных магнитных каналов (проверка идентичности измерительных каналов).

Оба канала повторяют друг друга до мельчайших подробностей.

Записи на идентичность многие исследователи проводят в полевых условиях путем регистрации естественных вариаций. Иногда такие записи повторяются периодически довольно часто в ущерб производительности основных работ. Для микровариационной станции ГГ42 эту работу мы считаем излишней. Необходимо лишь периодически контролировать линейность измерительных каналов, что делается весьма просто с помощью набора импульсов в градуировочном устройстве прибора.

Исследование источников внутренних шумов

Флуктуационные шумы в магнитном канале, как было установлено в первой главе, определяют его пороговую чувствительность. В связи с тем, что в образовании шумов преобладающая роль принадлежит элементам электрической схемы, экспериментальной проверке подвергались в основном активные электронные приборы: лампы, фотоумножители, осветители. Измерения уровня флуктуаций в указанных элементах проводились на специально собранной установке, электрическая схема которой дана на рис. 46. Установка представляет симметрич-

ную балансную схему, каждое плечо которой по своим параметрам эквивалентно фотоэлектрическому преобразователю, используемому в магнитном канале. Известно, что подобные балансные схемы снижают дрейф нуля, но не могут уменьшить случайные шумы, возникающие в ее плечах.

Вместо датчиков использовались неподвижные зеркальные вставки. Влияние шумов осветителя и его питания исключалось тем, что световой поток от одной лампы расщеплялся на два одинаковых световых пучка, которые после отражения от зеркальных вставок попадали на фотоумножители соответствующих плеч. Компенсация световых флуктуаций может быть эффективной лишь при равенстве чувствительностей обоих плеч. Эта регулировка производилась с помощью сопротивления R_5 .

Анодные токи балансировались с помощью потенциометра R_6

и контрольного индикатора mA , включаемого в анодную цепь каждой лампы и в диагональ балансной схемы (между анодами обеих ламп). В качестве чувствительного регистрирующего гальванометра Γ использовался один из гальванометров осциллографа ЭПО-8.

Был установлен следующий порядок измерений.

Испытание электронных ламп. Источник света B_c выключен, напряжение B_Φ для фотоумножителей выключено. Анодные токи в плечах балансной схемы — сбалансированы. Процесс записывался на осциллографе при малой скорости лентопротяжного механизма. Испытание производилось для серии ламп, для которых вычислялся средний уровень флуктуаций. Лампы с уровнем шумов, значительно превышающим средний уровень, отбраковывались. Путем ряда проб выбиралась такая пара

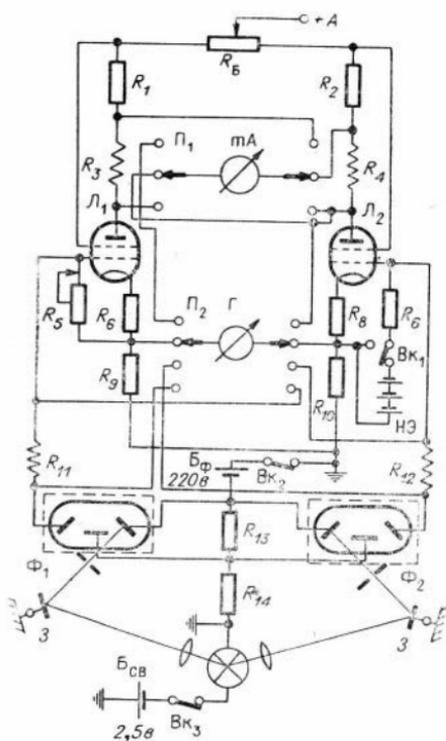


Рис. 46. Электрическая схема установки для испытания ламп, фотоумножителей и осветителя на уровень шумов.

ламп, у которых уровень шумов был минимален. В дальнейшем эти лампы использовались в качестве эталонной пары. После каждой серии измерений схема градуировалась путем включения на сетку одной из ламп известного напряжения. Это позволяло оценивать уровень шумов в абсолютной мере.

Испытание фотоумножителей. В схеме использовалась эталонная пара ламп L_1 и L_2 . Включались фотоумножители и на них наводились световые индексы от неподвижных зеркал Z . Разброс чувствительностей у ФЭУ-2 уравнивался с помощью сопротивления R_5 . Процесс записывался на осциллографе. После испытания серии фотоумножителей вычислялся средний уровень шумов, из которого вычитался средний уровень шумов, полученный ранее для эталонной пары ламп L_1 и L_2 . Путем ряда проб можно таким образом выбрать эталонную пару фотоумножителей, чтобы в дальнейшем использовать ее для отбраковки фотоумножителей с неудовлетворительными параметрами (по чувствительности, по уровню шумов).

Испытание влияния осветителя. В одном из плеч схемы фотоумножитель удалялся. Вместо него подавалось эквивалентное смещение на сетку лампы от нормальных элементов. Процесс записывался. Уровень шумов, вносимый осветителем, оценивался по разности между полученной записью и средним уровнем флуктуаций, полученным ранее для эталонной пары ламп и фотоумножителей. Данные этих измерений и были положены в основу анализа уровня шумов в фотоэлектрическом преобразователе, проведенного в первой главе.

Эффективных способов снижения шумов для приборов полевого типа, кроме введения обратной отрицательной связи, не существует. Поэтому экспериментально устанавливают наиболее вероятный уровень шумов и на основании этого определяют среднюю величину пороговой чувствительности, которую и указывают в паспорте серийно выпускаемой аппаратуры. Однако в необходимых случаях можно повысить пороговую чувствительность магнитных каналов путем тщательного выбора элементов схемы с наилучшими характеристиками, и в первую очередь, фотоумножителей (или фотоэлементов). Таким путем можно довести уровень пороговой чувствительности до $10^8 \frac{м.м}{э}$.

Рассмотрим простой способ оценки суммарного уровня шумов, который может рекомендовать в качестве периодической проверки магнитных каналов в микровариационной стадии типа ГГ42.

Вместо датчика в исследуемом магнитном канале устанавливают вставку с неподвижным зеркалом. Отраженный от неподвижного зеркала световой индекс должен быть введен в отвер-

стие диафрагмы фотоумножителя настолько, чтобы при включенном питании обеспечивался бы номинальный рабочий ток в лампе фотоэлектрического преобразователя или нулевой ток в цепи компенсации регистрирующего гальванометра. Процесс записывают на максимально возможной чувствительности в течение 5—10 мин. Средняя амплитуда шумовых вылесков $\bar{A}_{ш}$ и будет характеризовать уровень электронных шумов. Для того, чтобы получить значение шумов в эквивалентном выражении (приведенных к входу магнитного канала), необходимо проградуировать магнитный канал. При этом устанавливают магнитный датчик на место п, не сбивая прежней чувствительности гальванометра, определяют чувствительность магнитного канала по шкале осциллографа.

Для приведенного значения $\bar{H}_{ш}$ справедлива формула

$$\bar{H}_{ш} = \frac{\bar{A}_{ш}}{(1 + c\beta)^2 c'}$$

где $\bar{A}_{ш}$ — средняя амплитуда шумов, измеренных с зеркальной вставкой в миллиметрах; c' — чувствительность магнитного канала в $\frac{мм}{гамма}$ $1 + c\beta$ — параметр обратной связи, который обычно приводится в паспорте прибора*. При определении шумовых эффектов неизбежно сползание нуля-пункта регистрирующего гальванометра, которое не следует учитывать при оценке значения $A_{ш}$. Определение дрейфа нуля, вызываемого электронной схемой, производится по приведенной выше формуле отдельно.

Данным способом можно сравнительно легко отбраковать лампы и фотоумножители.

Изучение суммарного дрейфа нуля в магнитных каналах

Стабильность чувствительности п. Дрейф нуля тесно связан со стабильностью основного параметра магнитного канала — чувствительностью. В первой главе были изучены основные причины нестабильности чувствительности. Было установлено, что преобладающее влияние на чувствительность оказывают активные элементы фотоэлектрического преобразователя и источники питания. До определенных пределов стабилизация электрических параметров осуществляется с помощью глубокой обратной отрицательной связи.

* При неизвестном параметре $1 + c\beta$ его можно определить экспериментально, определив чувствительность магнитного канала без обратной связи (c) и с обратной связью (c'), при этом $\frac{c}{c'} = 1 + c\beta$.

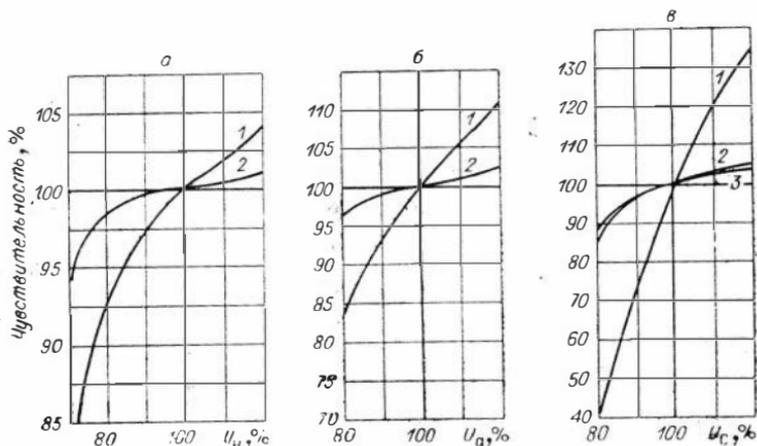


Рис. 47. Зависимость чувствительности магнитного канала от напряжений питающих источников.

1 — без обратной связи обратной ($\beta=0$); 2 — с связью ($\beta=1,5 \text{ э/а}$); 3 — с обратной связью ($\beta=1,5 \text{ э/а}$) и автокомпенсацией по источникам питания.

Из активных элементов на стабильность общей чувствительности магнитного канала наибольшее влияние оказывает фотумножитель (фотоэлемент), уход чувствительности которого за сутки может достигать в некоторых случаях 50%. С учетом обратной связи ($1 + \epsilon\beta = 20$) это эквивалентно изменению общей чувствительности на 2—3%.

Влияние источников питания на чувствительность легко проверить, изменяя питающие напряжения искусственно в допустимых пределах. На рис. 47 даны зависимости чувствительности от питающих напряжений. Наибольшее влияние на чувствительность оказывает источник питания осветителя, меньше — источники питания накала и анода. За счет источников питания уход чувствительности может достигать за сутки 3% от номинального значения. Проверка, проводимая при регистрации суточных вариаций, показывает, что суммарное изменение чувствительности магнитного канала за сутки не превышает 5%.

Суммарный дрейф нуля. Величина дрейфа нуля в магнитном канале микровариационной станции не поддается непосредственному измерению и может быть определена путем сравнения измерений, проведенных с помощью микровариационной станции и обычной вариационной станции. Чтобы создать одинаковые условия измерений, целесообразно использовать D -каналы этих приборов. Как известно, на магнитный датчик, ориентированный в направлении D -компоненты поля, не

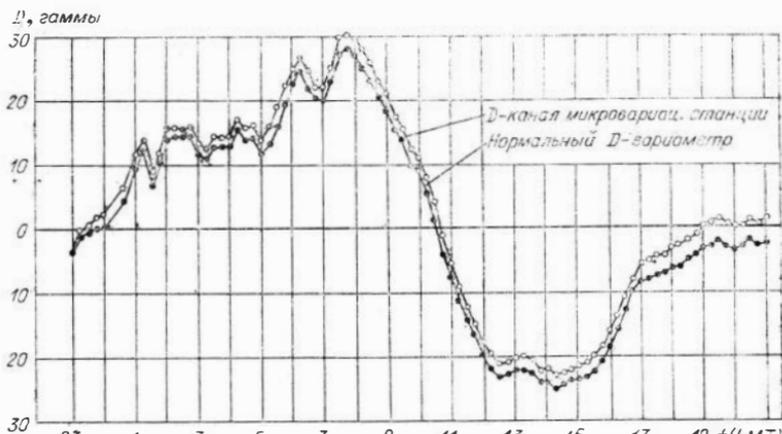


Рис. 48. Одновременная запись суточной вариации магнитного поля, произведенная с помощью D -канала станции ГГ42 и D -вариометра станции ИЗМИР АН.

действует температура (при условии, если растяжки датчиков полностью раскручены).

Одна из суточных записей нормального D -вариометра и D -канала микровариационной станции показана на рис. 48. Для наглядности амплитудный и временной масштабы на рисунке выбраны одинаковыми, а начало записей совмещено. В деталях обе записи подобны друг другу. В целом же записи расходятся между собой.

За период, равный примерно суткам, записи разошлись на 4,1 гаммы при амплитуде вариации 53 гаммы. Это расхождение мы относим за счет сползания нуля микровариометра.

На то, что дрейф вызван внутренними факторами в фотоумножителе, указывает характер дрейфа: быстрое расхождение в начале записи и монотонное — в дальнейшем. Запись сделана при обратной связи $1 + c\beta = 20$. Для регистрации длинных пери-

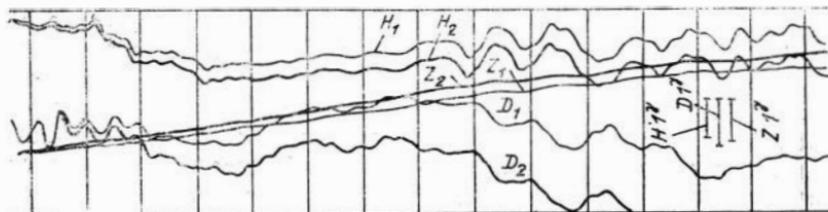


Рис. 49. Запись, произведенная с помощью двух станций типа ГГ42. У H_2 , D_2 , Z_2 система автокомпенсации дрейфа нуля отклонена.

одов чувствительность магнитного канала можно уменьшать путем увеличения β и тем самым снижать дрейф нулевого отсчета до 1—2 *гамм* за сутки.

Роль системы автокомпенсации в устранении дрейфа от источников питания иллюстрирует рис. 49, где приведены записи двух идентичных станций, имеющих общие источники питания (за исключением накальных), но отличающихся тем, что в одной станции цепи автокомпенсации отключены.

Определение полярности измерительных каналов

Для магнитных компонент поля положительными направлениями считаются: для H -компоненты — на север, для D -компоненты — на восток, для Z -компоненты — вертикально вниз. Для компоненты теллурического поля C — $Ю$ положительным направлением является северное, для компоненты B — $З$ — восточное направление.

Отклонение пишущих бликов гальванометров на осциллограмме вверх считается положительным, вниз — отрицательным.

Наиболее простым способом определения полярности магнитного канала является использование постоянного магнита. Постоянный магнит ориентирует в направлении оси симметрии датчика (по оси его катушек). При этом северный конец магнита направляют в сторону положительного направления компоненты поля, что соответствует возрастанию этой компоненты. Приближая магнит к датчику, наблюдают отклонение пишущего блика на шкале осциллографа. Если при сближении магнита с датчиком блик на осциллограмме отклоняется вверх, то полярность в магнитном канале установлена верно.

Для электрических каналов полярность проверяется следующим образом. К клемме, к которой подходит провод от положительного электрода (северного — для E_1 и восточного — для E_2), подключают плюс батарейки, к другой клемме — минус. Батарейку подключают через большое сопротивление. Если при этом пишущий блик будет отклоняться вверх на осциллограмме, то полярность теллурического канала выбрана правильно.

Определение температурных коэффициентов магнитоэлектрических датчиков

Простейшая установка, с помощью которой можно измерять температурные свойства датчиков, схематически показана на рис. 50. Нагреватель I представляет отрезок асбоцементной тру-

бы, имеющий высоту около 25 см и внутренний диаметр 20 см. Внутри цилиндра по его стенкам (по винтовой линии) равномерно уложена нагревательная спираль, концы которой выведены наружу. Сверху нагреватель закрыт крышкой из теплоизоляционного материала. В крышке имеется отверстие для термо-

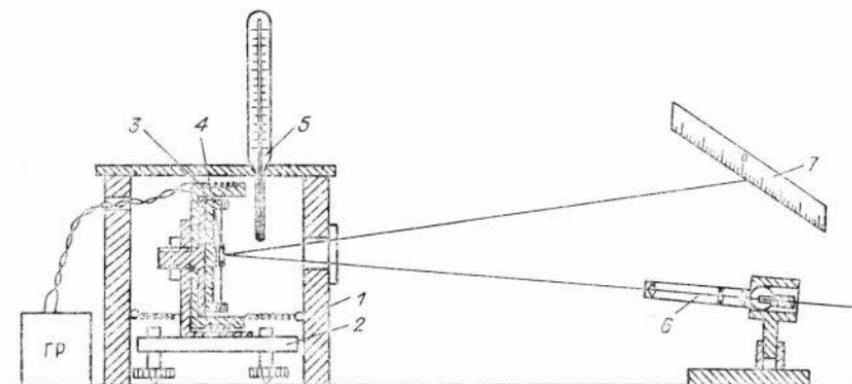


Рис. 50. Установка для определения температурных свойств магнитоэлектрических датчиков.

метра 5. Испытуемый датчик может накрываться нагревателем, поэтому нижнее основание отсутствует. Для прохода светового луча к датчику и обратно в стенке нагревателя имеется застекленное отверстие. Датчик крепится на подставке 2 на вертикальном кронштейне (на рисунке показано крепление для *H*-датчика 4). На вертикальном кронштейне крепится также кольцевой каркас 3 с градуировочной обмоткой (конструкцию кольцевого каркаса см. рис. 30). Внутри каркаса крепится испытуемый датчик, при этом для уменьшения тепловой инерции датчика должен быть снят цилиндрический домик. Плоскость основания *H*-датчика ориентируется перпендикулярно магнитному меридиану. Установку и ориентацию датчика производят с помощью накладного уровня и буссоли. Для испытания *Z*-датчика используют такую же подставку без вертикального кронштейна. Кольцевой каркас с градуировочной обмоткой и *Z*-датчик со снятым корпусом крепятся на горизонтальной плоскости подставки. В качестве осветителя используется проекционная осветительная система 6. Луч от осветителя направляется на зеркало *H*-датчика, отраженный световой луч проектируется на шкалу 7, которая отстоит от датчика на расстоянии 1,5—2 м. Для *Z*-датчика направление хода лучей изменяется при-

мой, которая приклеивается к стеклянной пластинке размером 4×10 см. Последняя устанавливается на бортах кольцевого каркаса. Всю оптическую настройку производят при снятом нагревателе, после чего нагревателем накрывают испытуемый датчик, не сбивая при этом оптическую настройку, так, чтобы световые лучи беспрепятственно проходили через застекленное отверстие. Для отсчета температуры нагрева используют термометр с пределами измерения не менее $0-150^\circ \text{C}$. Конец термометра должен находиться в непосредственной близости от магнитной системы датчика.

Перед нагреванием определяют цену деления датчика. В градуировочную обмотку включают ток I и берут отсчет по шкале Δn . Цена деления подсчитывается по формуле $\varepsilon = g \frac{I}{\Delta n}$, где g — постоянная градуировочной обмотки.

Отмечают начальную температуру t_0 и начальное положение светового индекса n_0 . К нагревателю подводят напряжение, которое регулируют, например, с помощью ЛАТРа. В течение $20-30$ мин температуру внутри нагревателя доводят примерно до 100°C , после чего напряжение регулируют таким образом, чтобы температура почти не изменялась, т. е. чтобы тепловые процессы внутри нагревателя приняли состояние, близкое к стационарному. При некоторой установившейся температуре t° делают отсчет по шкале (n).

Учитывая, что переменный ток в спирали нагревателя наводит переменное поле с частотой 50 гц и что это поле может размывать световой индекс на шкале, нагреватель во время взятия отсчета необходимо выключить.

В лаборатории, где исследуют температурные и другие свойства датчиков, уровень промышленных помех не должен превышать $2-3$ гаммы. Кроме того, необходимо учитывать изменения естественных вариаций за тот интервал времени, в течение которого производится нагревание датчиков. Для этого необходимо иметь контрольные датчики, с помощью которых можно было бы учитывать величину изменения поля. Для этой цели удобно использовать микровариационную станцию, наблюдая изменения различных компонент магнитного поля непосредственно по стрелочному индикатору. Чтобы правильно учесть знак поправки за вариацию магнитного поля Земли, необходимо определить полярность испытуемого датчика и контрольного магнитометра. Такое определение легко сделать с помощью постоянного магнита. Если в течение промежутка времени между начальным отсчетом n_0 и конечным n вариация поля получила приращение δH , то температурный коэффициент датчика с уче-

том этой поправки можно определить по формуле

$$\nu = \frac{(n - n_0) \varepsilon \pm \delta H}{t^\circ - t_0^\circ} \left[\frac{\text{гамма}}{\text{град}} \right].$$

Цену деления ε испытываемого датчика определяют как до нагрева, так и после и берут из них среднюю величину. Охлаждая датчик до первоначальной температуры, можно также установить степень температурной необратимости датчика.

Измерение температурных коэффициентов постоянных магнитов

Температурный коэффициент μ постоянного магнита характеризует относительное изменение магнитного момента при изменении температуры на 1°C ($\mu = \frac{\Delta M}{M t^\circ}$).

Определение температурных коэффициентов с высокой степенью точности необходимо при осуществлении температурной компенсации датчиков. Измерять величину μ можно с помощью любых магнитометров, если они обладают достаточной чувствительностью. Часто приходится иметь дело с магнитами, для которых необходимо уверенное измерение температурных коэффициентов порядка 10^{-5} и менее, поэтому предпочтение для таких измерений следует отдавать микровариационным приборам. Следует заметить, что измерения температурных коэффициентов магнитов проводятся, как правило, в стационарных условиях в специальных помещениях. Эти же измерения с помощью микровариационной станции ГГ42 можно проводить в любом месте, например, в поле, что часто и использовалось ввиду высокого уровня промышленных помех в городской местности.

Для измерения μ применяется известная методика. На расстоянии r_0 от датчика укрепляется измеряемый магнит (ось измеряемого магнита совпадает с осью датчика и перпендикулярна магниту датчика). Расстояние r_0 выбирается не менее 5—10-кратной длины исследуемого магнита. Для крепления магнита используется Г-образный кронштейн, изогнутый вниз с таким расчетом, чтобы была возможность подводить снизу сосуд с горячей водой, которая используется для нагревания магнита. Воду обычно доводят до кипения (100°C) в немагнитном, чаще всего стеклянном термостойком сосуде, и быстро создают контакт магнита с кипящей водой. При этом температура магнита практически скачком изменяется от температуры воздуха t_0° до температуры $t = 100^\circ$. Магнит довольно быстро принимает темпера-

туру окружающей воды, ввиду его незначительной массы и большой теплоемкости. Пусть соответствующий скачок магнитного поля отклонит стрелку индикатора на n_1 делений. В процессе измерений производят градуировку измерительного прибора известной величиной поля $H_{гр}$. Пусть это поле вызывает отклонение стрелки на n_0 делений. Тогда изменение магнитного момента магнита ΔM можно подсчитать по следующей формуле

$$\Delta M = \frac{H_{гр} n_1}{2n_0} r_0^3.$$

Магнитный момент исследуемого магнита можно определить, помещая его на некотором расстоянии r и затем относя на бесконечность. Величина r выбирается из такого расчета, чтобы измерение ΔM и M проводилось на одной шкале, т. е. при одной и той же цене деления измерительного канала. Пусть при перенесении магнита с расстояния r на бесконечность стрелочный прибор отклоняется на n_2 делений, тогда магнитный момент

$$M = \frac{H_{гр} n_2}{2n_0} r^3$$

и температурный коэффициент магнита можно определить следующим образом:

$$\mu = \frac{\Delta M}{M (t^\circ - t_0^\circ)} = \frac{r_0^3 n_1}{r^3 n_2 (t^\circ - t_0^\circ)}.$$

Определение постоянных для катушек типа колец Гельмгольца

Для колец типа Гельмгольца и катушек круговой формы постоянные легко вычисляются лишь относительно точек, лежащих в центре катушки или на ее оси. Во всех других точках для катушек любой формы расчет постоянных весьма затруднителен. Расчет не дает удовлетворительных результатов и в тех случаях, если размеры катушек малы и если сечение обмотки велико. Во многих случаях определение постоянных (или геометрических факторов) для катушек любой формы можно произвести экспериментально с довольно высокой точностью. Наиболее просто определяются постоянные для колец Гельмгольца, которые не требуют тщательной юстировки относительно датчика магнитного поля. Для всех остальных катушек необходимо точное совмещение с центром датчика той точки, относительно которой требуется определить постоянную данной катушки.

Принципиальная схема для определения постоянных катушек показана на рис. 51. В схеме используют эталонную катуш-

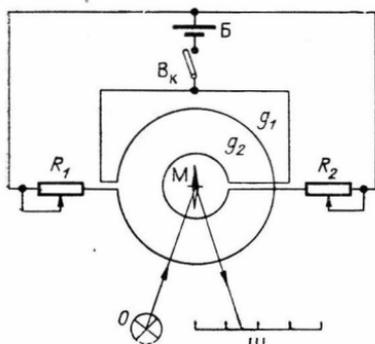


Рис. 51. Электрическая схема для определения постоянных (геометрических факторов) катушек.

и R_2 добиваются того, чтобы при включении тумблера B_k индикатор не отклонялся от своего начального положения. Очевидно, это имеет место тогда, если выполнено условие:

$$g_1 I_1 = g_2 I_2,$$

где I_1, I_2 — токи, протекающие соответственно через эталонную и измеряемую катушки. Учитывая, что приложенное к той и другой цепи напряжение одинаково, будем иметь

$$\frac{g_1}{R_1} = \frac{g_2}{R_2}.$$

Можно выбрать сопротивления R_1, R_2 достаточно большим, чтобы пренебречь сопротивлением самих катушек и подводящих проводов.

Для точных измерений g_2 необходимо определить указанные сопротивления с помощью измерительного моста. Тогда в показания магазинов R_1 и R_2 следует ввести поправки $R(g_1)$ и $R(g_2)$:

$$g_2 = \frac{R_1 + R(g_1)}{R_2 + R(g_2)} g_1.$$

Точность измерения g_2 будет тем выше, чем больше напряжение питающей батареи B и чем выше чувствительность датчика-индикатора. Для определения геометрических факторов для обмоток магнитных датчиков микровариационной станции ГГ42 эталонные кольца Гельмгольца совмещаются с центрами исследуемых катушек, а в качестве индикатора используется соответствующий измерительный канал станции. Погрешность определения постоянных для катушек станции ГГ42 данным способом практически не превышает погрешность, эталонировочных колец.

ку с известной постоянной g_1 . Лучшее всего в качестве эталонной катушки использовать кольца Гельмгольца большого диаметра. Катушка, постоянную которой требуется определить, обозначена на схеме g_2 . В цепь каждой катушки включены магазины сопротивлений R_1 и R_2 . Катушки устанавливаются таким образом, чтобы их моменты были антипараллельны. В качестве индикатора M может быть использован любой магнитостатический датчик, имеющий приспособление для визуального отсчета (шкалу L и осветитель O). Путем подбора сопротивлений R_1

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Т А Б Л И Ц Ы

Значения переходной функции (67) для I звена микроварнометра (датчик + фотообразователь)

af_0	$t/a, \text{сек}$	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4
	h									
$f_0 = 1$ $2\alpha, \alpha = 1$	$2\pi f_0$	0,011	0,040	0,131	0,358	0,715	0,960	0,999	1,000	1,000
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,011	0,039	0,123	0,325	0,643	0,908	0,994	1,000	1,000
	$4\pi f_0$	0,011	0,037	0,114	0,293	0,574	0,840	0,981	1,000	1,000
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,010	0,035	0,106	0,261	0,510	0,786	0,959	0,999	1,000
	$8\pi f_0$	0,010	0,034	0,097	0,232	0,451	0,720	0,927	0,995	1,000
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,010	0,032	0,088	0,203	0,396	0,653	0,885	0,987	1,000
	$16\pi f_0$	0,009	0,029	0,079	0,178	0,346	0,587	0,835	0,974	0,999
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,009	0,027	0,069	0,154	0,301	0,523	0,778	0,952	0,998
	$32\pi f_0$	0,008	0,025	0,062	0,133	0,261	0,463	0,717	0,921	0,993

Примечание. Значения переходной функции для других собственных частот, отличающихся от $f_0=1$ множителем a , берут из данной таблицы, разделив предварительно значения первой строки t/a на число a .

Таблица II

Частотные характеристики I звена микроварнометра (датчик + фотообразователь)

af_0 2α	$a/f, \text{сц}$	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6
	n									
$f_0 = 1$ $a = 1$	$2\pi f_0$	0,990	0,961	0,862	0,610	0,281	0,089	0,024	0,006	0,002
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,982	0,933	0,788	0,516	0,243	0,084	0,023	0,006	0,002
	$4\pi f_0$	0,971	0,897	0,710	0,436	0,209	0,077	0,023	0,006	0,002
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,956	0,853	0,630	0,368	0,178	0,070	0,022	0,006	0,002
	$8\pi f_0$	0,937	0,800	0,553	0,310	0,151	0,063	0,021	0,006	0,002
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,910	0,740	0,481	0,262	0,129	0,056	0,020	0,006	0,002
	$16\pi f_0$	0,877	0,674	0,414	0,220	0,109	0,049	0,019	0,006	0,001
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,835	0,605	0,355	0,185	0,092	0,047	0,017	0,005	0,001
	$32\pi f_0$	0,786	0,536	0,302	0,156	0,078	0,037	0,015	0,005	0,001

Примечание. Дискретные значения частотной характеристики для других собственных частот, отличающихся от $f_0=1$ множителем a , берут из данной таблицы, умножив предварительно значения первой строки (a/f) на число a .

**Фазовые характеристики
I звена микровариометра (датчик + фотопреобразователь)**

$af_0, \frac{a}{\omega}$	$\frac{af_0, \frac{a}{\omega}}{h}$	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6
	$f_0 = 1 \frac{a}{\omega}, a = 1$	$2\pi f_0$	11,4	22,6	43,6	77,3	116,0	145,2	162,0	171,0
$2\sqrt{2}\pi f_0$		13,5	26,3	48,5	79,2	112,3	140,0	159,0	169,0	174,0
$4\pi f_0$		15,9	30,5	53,4	80,9	109,0	135,0	155,0	167,0	173,0
$4\sqrt{2}\pi f_0$		18,7	35,0	58,0	82,4	106,2	130,6	151,6	165,2	172,5
$8\pi f_0$		22,0	39,8	62,3	83,6	103,7	125,8	147,3	162,6	171,1
$8\sqrt{2}\pi f_0$		25,6	44,7	66,1	84,6	101,6	124,2	142,7	159,5	169,4
$16\pi f_0$		29,7	49,7	69,6	85,4	99,8	117,0	137,8	156,0	167,5
$16\sqrt{2}\pi f_0$		34,2	54,5	72,6	86,1	98,2	113,2	132,8	152,1	165,2
$32\pi f_0$		38,9	59,0	75,2	86,8	96,9	109,8	127,9	147,8	162,6

Примечание. Фазовые сдвиги при других значениях собственных частот (в a раз отличающихся от $f_0=1 \frac{a}{\omega}$) берут из этой же таблицы, умножив предварительно значения первой строки (af) на число a .

Значения переходной функции фильтров RC , применяемых в магнитных измерительных каналах (двухзвенный RC -фильтр, $n=1$)

a	$\begin{matrix} ta, \text{сек} \\ \tau=RC, \text{сек} \end{matrix}$	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	51,2
	1	20	0,985	0,970	0,942	0,886	0,783	0,639	0,355	0,085	-0,064
$\sqrt{2}$	40	0,989	0,979	0,958	0,918	0,842	0,707	0,490	0,214	-0,011	-0,075
2	60	0,990	0,980	0,960	0,923	0,851	0,721	0,512	0,238	-0,002	-0,076
$2\sqrt{2}$	80	0,989	0,979	0,958	0,918	0,842	0,707	0,490	0,214	-0,011	-0,075
4	100	0,988	0,976	0,953	0,908	0,823	0,675	0,444	0,165	-0,035	-0,073
$4\sqrt{2}$	120	0,986	0,972	0,945	0,892	0,795	0,628	0,379	0,105	-0,058	-0,066
8	140	0,983	0,966	0,933	0,871	0,757	0,566	0,301	0,043	-0,072	-0,055
$8\sqrt{2}$	160	0,978	0,958	0,918	0,842	0,707	0,490	0,214	0,011	-0,075	-0,043
16	180	0,973	0,947	0,898	0,805	0,645	0,402	0,126	0,051	-0,068	-0,031
$16\sqrt{2}$	200	0,966	0,934	0,872	0,759	0,569	0,305	0,046	-0,071	-0,056	-0,019

Двухзвенный RC -фильтр, $n=2$

1	20	0,987	0,975	0,951	0,904	0,815	0,660	0,419	0,128	-0,072	-0,085
$\sqrt{2}$	40	0,991	0,982	0,965	0,931	0,866	0,748	0,550	0,273	0,006	-0,099
2	60	0,991	0,983	0,967	0,935	0,874	0,761	0,570	0,299	0,024	-0,098
$2\sqrt{2}$	80	0,991	0,982	0,965	0,931	0,866	0,748	0,550	0,273	0,006	-0,

a	t_a , сек	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	51,2
	$\tau=RC$, сек										
4	100	0,990	0,980	0,960	0,923	0,850	0,719	0,505	0,202	-0,027	-0,097
$4\sqrt{2}$	120	0,988	0,977	0,954	0,909	0,826	0,676	0,443	0,152	-0,063	-0,089
8	140	0,985	0,972	0,944	0,891	0,792	0,621	0,364	0,078	-0,089	-0,073
$8\sqrt{2}$	160	0,982	0,965	0,931	0,867	0,748	0,550	0,273	0,006	-0,099	-0,053
16	180	0,978	0,956	0,914	0,835	0,693	0,466	0,177	0,051	-0,093	-0,034
$16\sqrt{2}$	200	0,972	0,945	0,892	0,794	0,624	0,368	0,081	-0,087	-0,074	-0,018

Однозвенный фильтр RC

1	20	0,995	0,990	0,981	0,961	0,923	0,852	0,726	0,527	0,278	0,077
$\sqrt{2}$	40	0,996	0,992	0,986	0,972	0,945	0,893	0,797	0,636	0,404	0,164
2	60	0,997	0,993	0,987	0,974	0,948	0,899	0,808	0,653	0,426	0,181
$2\sqrt{2}$	80	0,996	0,992	0,986	0,972	0,945	0,893	0,797	0,636	0,404	0,161
4	100	0,996	0,992	0,984	0,968	0,938	0,880	0,774	0,599	0,359	0,129
$4\sqrt{2}$	120	0,995	0,990	0,981	0,963	0,927	0,860	0,740	0,547	0,299	0,089
8	140	0,994	0,989	0,977	0,955	0,913	0,833	0,694	0,481	0,232	0,054
$8\sqrt{2}$	160	0,992	0,985	0,972	0,945	0,893	0,797	0,636	0,404	0,163	0,027
16	180	0,991	0,982	0,965	0,931	0,867	0,752	0,566	0,320	0,102	0,010
$16\sqrt{2}$	200	0,988	0,978	0,956	0,913	0,834	0,696	0,485	0,235	0,055	0,003

Примечание. Значения времени t_a первой строки соответствуют $\tau=20$ сек ($a=1$). Для других параметров τ необходимо значения первой строки умножить на соответствующее число a .

Таблица V

Частотные характеристики *RC*-фильтров, применяемых в магнитных измерительных каналах (двухзвенный *RC*-фильтр, $n=1$)

a	$f/a, \text{зГц}$	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	0,128	0,256
	$\tau = RC, \text{сек}$										
1	20	0,004	0,015	0,052	0,168	0,333	0,580	0,835	0,958	0,987	0,997
$\sqrt{2}$	40	0,008	0,029	0,092	0,230	0,461	0,729	0,906	0,973	0,993	0,998
2	60	0,0086	0,032	0,100	0,247	0,484	0,749	0,915	0,977	0,994	0,999
$2\sqrt{2}$	80	0,008	0,029	0,092	0,230	0,461	0,729	0,906	0,973	0,987	0,997
4	100	0,006	0,023	0,076	0,199	0,414	0,685	0,884	0,967	0,991	0,998
$4\sqrt{2}$	120	0,004	0,017	0,058	0,162	0,355	0,622	0,849	0,955	0,988	0,997
8	140	0,003	0,012	0,042	0,125	0,292	0,545	0,798	0,936	0,983	0,996
$8\sqrt{2}$	160	0,002	0,008	0,029	0,092	0,23	0,461	0,729	0,906	0,973	0,933
16	180	0,001	0,005	0,019	0,064	0,175	0,376	0,645	0,862	0,960	0,989
$16\sqrt{2}$	200	0,001	0,003	0,012	0,043	0,127	0,295	0,549	0,800	0,937	0,983

Двухзвенный *RC*-фильтр, $n=2$

1	20	0,004	0,015	0,056	0,173	0,402	0,688	0,838	0,969	0,992	0,998
$\sqrt{2}$	40	0,008	0,030	0,101	0,274	0,547	0,806	0,940	0,984	0,996	0,999
2	60	0,009	0,033	0,111	0,294	0,571	0,822	0,946	0,986	0,996	0,999
$2\sqrt{2}$	80	0,008	0,030	0,101	0,274	0,547	0,806	0,940	0,984	0,996	0,999

a	$f/a, \text{зц}$ $\tau=RC, \text{сек}$	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	0,128	0,256
		4	100	0,006	0,023	0,083	0,234	0,494	0,767	0,925	0,980
$4\sqrt{2}$	120	0,004	0,017	0,062	0,188	0,426	0,710	0,899	0,972	0,993	0,998
8	140	0,003	0,012	0,044	0,142	0,350	0,635	0,861	0,959	0,989	0,997
$8\sqrt{2}$	160	0,002	0,008	0,030	0,101	0,274	0,547	0,806	0,940	0,984	0,996
16	180	0,001	0,005	0,019	0,069	0,204	0,450	0,731	0,909	0,975	0,994
$16\sqrt{2}$	200	0,001	0,003	0,012	0,045	0,144	0,354	0,639	0,863	0,960	0,990

Однозвенный RC-фильтр

1	20	0,063	0,125	0,213	0,449	0,708	0,895	0,970	0,992	0,998	1,000
$\sqrt{2}$	40	0,088	0,175	0,335	0,579	0,818	0,943	0,985	0,996	0,999	1,000
2	60	0,094	0,185	0,353	0,602	0,883	0,949	0,986	0,997	0,999	1,000
$2\sqrt{2}$	80	0,088	0,175	0,335	0,579	0,818	0,943	0,985	0,996	0,990	1,000
4	100	0,078	0,155	0,300	0,532	0,782	0,929	0,981	0,995	0,999	1,000
$4\sqrt{2}$	120	0,066	0,132	0,258	0,470	0,729	0,905	0,974	0,993	0,998	0,999
8	140	0,055	0,109	0,215	0,403	0,660	0,869	0,962	0,990	0,997	0,999
$8\sqrt{2}$	160	0,044	0,088	0,174	0,335	0,579	0,818	0,943	0,985	0,996	0,999
16	180	0,035	0,070	0,140	0,272	0,492	0,749	0,915	0,976	0,994	0,998
$16\sqrt{2}$	200	0,028	0,055	0,110	0,217	0,406	0,664	0,871	0,963	0,990	0,997

Примечание. Значения частоты f/a в таблице приведены при $a=1$, т.е. соответствуют строке с параметром $\tau=20$ сек. Для других параметров необходимо произвести деление данных значений f/a на соответствующее каждому параметру число ϕ .

Таблица VI

Фазовые характеристики *RC*-фильтров, применяемых в магнитных измерительных каналах
(двухзвенный *RC*-фильтр, $n=1$)

a	$f/a, \text{Гц}$	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	0,128	0,256
	$\tau=RC, \text{сек}$										
1	20	169,3	159,0	140,8	124,0	89,60	62,50	38,50	20,67	10,60	5,333
$\sqrt{2}$	40	164,9	151,2	129,3	103,1	76,53	50,29	28,56	14,89	7,527	3,774
2	60	164,1	149,6	127,1	100,8	74,27	48,18	28,09	14,06	7,100	3,560
$2\sqrt{2}$	80	165	151,2	129,3	103,1	76,53	50,29	28,56	14,89	7,527	3,774
4	100	166,7	154,2	133,7	107,8	81,27	54,81	31,85	16,77	8,507	4,269
$4\sqrt{2}$	120	168,6	157,8	139,2	114,1	87,55	60,99	36,66	19,62	10,07	5,029
8	140	170,6	161,6	145,2	121,4	94,90	68,35	42,85	23,51	12,09	6,091
$8\sqrt{2}$	160	172,4	165,0	151,1	129,3	103,1	76,53	50,29	28,56	14,89	7,527
16	180	173,9	168,0	156,6	137,3	111,8	85,30	58,76	34,88	18,55	9,442
$16\sqrt{2}$	200	175,2	170,5	161,4	144,9	121,0	94,51	67,96	42,51	23,30	11,97

Двухзвенный *RC*-фильтр, $n=2$

1	20	171,0	162,3	146,1	120,7	89,76	58,81	33,53	17,52	8,868	4,448
$\sqrt{2}$	40	167,4	155,3	134,5	105,5	73,97	45,10	24,40	12,49	6,284	3,147

a	$f/a, \text{ эц}$ $\tau = RC, \text{ сек}$	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	0,128	0,256
		2	60	166,6	154,0	132,3	102,9	71,33	42,96	23,08	11,79
$2\sqrt{2}$	80	167,4	155,3	134,5	105,5	73,97	45,10	24,40	12,49	6,284	3,147
4	100	168,8	158,1	138,9	111,0	79,55	49,76	27,38	14,10	7,105	3,560
$4\sqrt{2}$	120	170,5	161,3	144,3	118,2	87,06	56,36	31,81	16,55	8,365	4,194
8	140	172,2	164,4	150,0	126,3	95,87	64,53	37,70	19,93	10,12	5,082
$8\sqrt{2}$	160	173,6	167,4	155,3	134,5	105,5	73,97	45,10	24,40	12,49	6,284
16	180	174,9	169,9	160,1	142,5	115,7	84,36	53,95	30,16	15,63	7,890
$16\sqrt{2}$	200	176,0	172,1	164,3	149,7	125,8	95,41	64,09	37,37	19,74	10,02

Однозвенный RC-фильтр

1	20	86,40	82,84	75,89	63,31	44,85	26,44	13,96	7,088	3,557	1,780
$\sqrt{2}$	40	84,92	79,92	70,43	54,59	35,12	19,38	9,973	5,025	2,517	1,259
2	60	84,62	79,32	69,34	52,98	33,55	18,34	9,413	4,739	2,373	1,187

$2\sqrt{2}$	80	84,92	79,92	70,43	54,59	35,12	19,38	9,973	5,025	3,517	1,259
4	100	85,51	81,07	72,56	57,86	38,51	21,70	11,25	5,681	2,847	1,424
$4\sqrt{2}$	120	86,19	82,41	75,07	61,94	43,16	25,12	13,19	6,686	3,354	1,679
8	140	86,85	83,72	77,60	66,62	48,66	29,61	15,86	8,088	4,064	2,035
$8\sqrt{2}$	160	87,46	84,92	79,92	70,43	54,59	35,12	19,38	9,973	5,025	2,517
16	180	87,98	85,96	81,95	74,21	60,51	41,48	23,85	12,46	6,307	3,163
$16\sqrt{2}$	200	88,41	86,82	83,66	77,47	66,04	48,38	29,38	15,71	8,007	4,023

Примечание. Значения частоты f/a приведены в таблице для параметра $\tau=20$. Для других параметров необходимо произвести деление приведенных в строке f/a чисел на соответствующее каждому параметру число a .

Значения переходной функции, вычисленной по формулам (94), (95), (103) и (105)
(магнитный канал с двухзвенным фильтром, $n=1$)

f_0 , Гц	$\tau=RC$, сек h	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
		0,5	$2\pi f_0$	0,859	0,913	0,939	0,950	0,959	0,964	0,968	0,972
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,825	0,890	0,919	0,933	0,945	0,952	0,957	0,961	0,965	0,967
	$4\pi f_0$	0,794	0,869	0,901	0,919	0,933	0,940	0,948	0,953	0,956	0,960
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,766	0,850	0,884	0,907	0,920	0,931	0,938	0,944	0,949	0,952
	$8\pi f_0$	0,738	0,827	0,868	0,892	0,907	0,919	0,927	0,934	0,940	0,944
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,706	0,806	0,849	0,875	0,895	0,906	0,917	0,923	0,930	0,936
	$16\pi f_0$	0,677	0,780	0,831	0,860	0,879	0,894	0,904	0,914	0,919	0,926
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,646	0,757	0,808	0,840	0,864	0,879	0,892	0,900	0,909	0,916
	$32\pi f_0$	0,614	0,731	0,787	0,822	0,845	0,864	0,877	0,888	0,896	0,904
0,5 $\sqrt{2}$	$2\pi f_0$	0,877	0,925	0,945	0,957	0,963	0,969	0,973	0,975	0,977	0,979
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,846	0,904	0,929	0,942	0,952	0,958	0,963	0,967	0,969	0,972
	$4\pi f_0$	0,817	0,885	0,914	0,930	0,940	0,948	0,955	0,958	0,962	0,966
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,788	0,865	0,899	0,917	0,931	0,939	0,946	0,950	0,955	0,959
	$8\pi f_0$	0,762	0,847	0,881	0,903	0,919	0,928	0,936	0,943	0,947	0,951
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,736	0,825	0,867	0,890	0,906	0,918	0,926	0,934	0,940	0,943

	$16\pi f_0$	0,704	0,804	0,847	0,874	0,894	0,906	0,916	0,923	0,930	0,936
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,675	0,779	0,830	0,859	0,878	0,894	0,904	0,913	0,919	0,926
	$32\pi f_0$	0,645	0,756	0,807	0,839	0,863	0,878	0,892	0,900	0,909	0,915
1	$2\pi f_0$	0,889	0,936	0,958	0,962	0,969	0,973	0,976	0,978	0,981	0,982
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,861	0,914	0,936	0,950	0,957	0,963	0,967	0,971	0,973	0,976
	$4\pi f_0$	0,834	0,897	0,923	0,939	0,948	0,955	0,960	0,964	0,967	0,969
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,812	0,881	0,909	0,928	0,938	0,946	0,952	0,957	0,961	0,963
	$8\pi f_0$	0,784	0,863	0,897	0,915	0,927	0,937	0,945	0,949	0,954	0,958
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,760	0,842	0,880	0,902	0,918	0,927	0,936	0,941	0,946	0,951
	$16\pi f_0$	0,734	0,824	0,886	0,890	0,905	0,918	0,925	0,933	0,939	0,943
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,702	0,803	0,847	0,873	0,893	0,905	0,916	0,922	0,930	0,935
	$32\pi f_0$	0,674	0,778	0,829	0,858	0,878	0,893	0,903	0,913	0,918	0,925
$\sqrt{2}$	$2\pi f_0$	0,904	0,942	0,959	0,967	0,973	0,976	0,979	0,982	0,983	0,985
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,878	0,926	0,945	0,955	0,963	0,967	0,972	0,975	0,977	0,978
	$4\pi f_0$	0,854	0,910	0,933	0,946	0,955	0,960	0,965	0,969	0,971	0,974
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,830	0,894	0,921	0,936	0,946	0,953	0,958	0,963	0,965	0,968
	$8\pi f_0$	0,808	0,876	0,907	0,926	0,937	0,944	0,951	0,956	0,960	0,963
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,782	0,861	0,895	0,914	0,926	0,937	0,943	0,949	0,954	0,957
	$16\pi f_0$	0,758	0,841	0,879	0,901	0,917	0,926	0,935	0,940	0,946	0,950
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,732	0,823	0,865	0,889	0,904	0,917	0,925	0,933	0,937	0,942

$f_{0,2\Omega}$	$\tau=RC, \text{сек}$ h	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
		$32\pi f_0$	0,701	0,802	0,846	0,873	0,893	0,905	0,915	0,922	0,929
2	$2\pi f_0$	0,913	0,950	0,964	0,972	0,976	0,980	0,982	0,984	0,985	0,987
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,890	0,933	0,952	0,962	0,967	0,972	0,976	0,978	0,980	0,982
	$4\pi f_0$	0,869	0,919	0,940	0,953	0,960	0,966	0,969	0,972	0,975	0,977
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,850	0,907	0,931	0,944	0,952	0,959	0,964	0,967	0,970	0,973
	$8\pi f_0$	0,827	0,892	0,919	0,934	0,944	0,952	0,958	0,960	0,965	0,968
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,806	0,875	0,906	0,923	0,936	0,943	0,950	0,956	0,959	0,962
	$16\pi f_0$	0,780	0,860	0,894	0,914	0,926	0,936	0,942	0,948	0,954	0,956
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,757	0,840	0,879	0,900	0,916	0,926	0,935	0,940	0,946	0,950
	$32\pi f_0$	0,731	0,822	0,864	0,888	0,904	0,917	0,925	0,932	0,937	0,942
$2\sqrt{2}$	$2\pi f_0$	0,925	0,957	0,969	0,975	0,979	0,983	0,985	0,986	0,987	0,989
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,904	0,942	0,958	0,967	0,972	0,976	0,978	0,981	0,983	0,984
	$4\pi f_0$	0,885	0,930	0,948	0,958	0,966	0,969	0,973	0,976	0,979	0,980
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,865	0,917	0,939	0,950	0,959	0,963	0,968	0,972	0,974	0,976
	$8\pi f_0$	0,847	0,903	0,928	0,943	0,952	0,958	0,962	0,966	0,970	0,972
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,824	0,890	0,918	0,934	0,943	0,951	0,957	0,960	0,964	0,967

	$16\pi f_0$	0,804	0,874	0,906	0,923	0,936	0,943	0,950	0,955	0,958	0,962
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,779	0,859	0,894	0,913	0,926	0,936	0,942	0,948	0,953	0,955
	$32\pi f_0$	0,756	0,839	0,878	0,900	0,916	0,926	0,934	0,940	0,945	0,950
4	$2\pi f_0$	0,936	0,962	0,973	0,978	0,982	0,985	0,986	0,988	0,989	0,990
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,914	0,950	0,964	0,971	0,976	0,979	0,981	0,983	0,985	0,986
	$4\pi f_0$	0,897	0,939	0,955	0,964	0,969	0,974	0,977	0,980	0,981	0,983
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,881	0,928	0,947	0,957	0,963	0,969	0,973	0,975	0,977	0,979
	$8\pi f_0$	0,863	0,915	0,937	0,949	0,958	0,963	0,968	0,971	0,973	0,975
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,842	0,902	0,927	0,941	0,951	0,958	0,962	0,966	0,969	0,971
	$16\pi f_0$	0,824	0,890	0,918	0,933	0,943	0,951	0,955	0,960	0,964	0,967
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,803	0,873	0,905	0,922	0,935	0,943	0,950	0,953	0,958	0,962
	$32\pi f_0$	0,778	0,858	0,893	0,913	0,925	0,935	0,942	0,948	0,953	0,955

Магнитный канал с двухзвенным RC -фильтром, $n=2$

0,5	$2\pi f_0$	0,878	0,927	0,947	0,957	0,965	0,970	0,973	0,976	0,978	0,980
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,846	0,906	0,930	0,944	0,952	0,959	0,964	0,967	0,970	0,972
	$4\pi f_0$	0,819	0,886	0,914	0,931	0,942	0,949	0,955	0,960	0,963	0,966
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,792	0,867	0,900	0,919	0,931	0,940	0,946	0,952	0,956	0,960
	$8\pi f_0$	0,764	0,843	0,885	0,906	0,920	0,930	0,938	0,943	0,948	0,952

$f_0, \text{гц}$	$\tau = RC, \text{сек}$ h	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
		$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,736	0,827	0,867	0,892	0,907	0,919	0,928	0,935	0,940
$16\pi f_0$	0,708	0,805	0,850	0,877	0,894	0,907	0,917	0,925	0,931	0,936	
$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,677	0,781	0,831	0,860	0,880	0,894	0,905	0,914	0,921	0,927	
$32\pi f_0$	0,646	0,757	0,810	0,842	0,864	0,880	0,892	0,902	0,910	0,917	
$0,5\sqrt{2}$	$2\pi f_0$	0,893	0,936	0,954	0,963	0,969	0,973	0,977	0,979	0,981	0,983
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,863	0,917	0,939	0,950	0,958	0,964	0,968	0,971	0,974	0,976
	$4\pi f_0$	0,838	0,900	0,925	0,940	0,949	0,956	0,961	0,965	0,968	0,970
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,813	0,882	0,912	0,928	0,939	0,947	0,958	0,958	0,961	0,965
	$8\pi f_0$	0,788	0,864	0,898	0,917	0,930	0,938	0,945	0,950	0,955	0,958
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,762	0,846	0,882	0,904	0,918	0,928	0,937	0,943	0,947	0,952
	$16\pi f_0$	0,734	0,825	0,866	0,891	0,906	0,918	0,927	0,934	0,939	0,944
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,706	0,804	0,849	0,875	0,894	0,907	0,917	0,924	0,930	0,936
	$32\pi f_0$	0,676	0,781	0,830	0,860	0,879	0,894	0,905	0,913	0,921	0,927
	$2\pi f_0$	0,906	0,944	0,960	0,968	0,973	0,977	0,980	0,982	0,984	0,985
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,879	0,927	0,946	0,957	0,964	0,969	0,972	0,975	0,977	0,979
	$4\pi f_0$	0,856	0,911	0,934	0,947	0,955	0,961	0,966	0,969	0,972	0,974
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,833	0,895	0,922	0,937	0,947	0,954	0,959	0,963	0,967	0,969

1	$8\pi f_0$	0,809	0,880	0,910	0,927	0,938	0,946	0,952	0,957	0,961	0,964
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,785	0,863	0,896	0,916	0,928	0,938	0,944	0,950	0,954	0,958
	$16\pi f_0$	0,760	0,844	0,881	0,903	0,917	0,928	0,936	0,942	0,947	0,951
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,733	0,824	0,865	0,889	0,906	0,918	0,926	0,934	0,939	0,943
	$32\pi f_0$	0,704	0,803	0,848	0,875	0,893	0,906	0,916	0,924	0,930	0,935
$\sqrt{2}$	$2\pi f_0$	0,917	0,951	0,965	0,972	0,977	0,980	0,983	0,984	0,986	0,987
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,893	0,936	0,953	0,962	0,968	0,973	0,976	0,978	0,980	0,982
	$4\pi f_0$	0,872	0,922	0,942	0,953	0,961	0,966	0,970	0,973	0,976	0,978
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,850	0,908	0,932	0,945	0,953	0,960	0,964	0,968	0,971	0,973
	$8\pi f_0$	0,829	0,893	0,920	0,936	0,946	0,953	0,958	0,962	0,965	0,968
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,807	0,878	0,908	0,926	0,937	0,945	0,951	0,956	0,960	0,963
	$16\pi f_0$	0,783	0,861	0,895	0,915	0,927	0,937	0,944	0,949	0,953	0,957
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,758	0,843	0,881	0,902	0,917	0,927	0,935	0,942	0,947	0,951
$32\pi f_0$	0,732	0,824	0,865	0,889	0,905	0,917	0,926	0,932	0,939	0,943	
2	$2\pi f_0$	0,927	0,957	0,970	0,976	0,980	0,983	0,985	0,987	0,988	0,989
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,906	0,944	0,959	0,967	0,973	0,976	0,979	0,981	0,983	0,985
	$4\pi f_0$	0,886	0,931	0,949	0,960	0,966	0,971	0,974	0,977	0,979	0,981
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,867	0,919	0,940	0,952	0,960	0,965	0,969	0,972	0,975	0,977
	$8\pi f_0$	0,848	0,906	0,930	0,943	0,952	0,959	0,964	0,967	0,970	0,972

$f_0, \frac{2\pi}{T}$	$\tau = RC, \text{сек}$ h	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
		$8\sqrt{2} \pi f_0$	0,827	0,892	0,919	0,935	0,945	0,952	0,957	0,961	0,965
$16\pi f_0$	0,805	0,877	0,907	0,925	0,936	0,944	0,951	0,956	0,960	0,963	
$16\sqrt{2} \pi f_0$	0,781	0,860	0,894	0,914	0,926	0,936	0,943	0,943	0,953	0,957	
$32\pi f_0$	0,757	0,843	0,880	0,902	0,917	0,927	0,935	0,941	0,946	0,950	
$2\sqrt{2}$	$2\pi f_0$	0,936	0,963	0,973	0,979	0,983	0,985	0,987	0,988	0,990	0,990
	$2\sqrt{2} \pi f_0$	0,916	0,950	0,964	0,971	0,976	0,979	0,982	0,984	0,985	0,987
	$4\pi f_0$	0,900	0,940	0,956	0,965	0,970	0,974	0,978	0,980	0,982	0,983
	$4\sqrt{2} \pi f_0$	0,882	0,928	0,947	0,958	0,965	0,969	0,973	0,976	0,978	0,980
	$8\pi f_0$	0,864	0,917	0,938	0,950	0,958	0,964	0,968	0,971	0,974	0,976
	$8\sqrt{2} \pi f_0$	0,846	0,904	0,928	0,943	0,952	0,958	0,963	0,967	0,969	0,972
	$16\pi f_0$	0,825	0,891	0,918	0,934	0,944	0,951	0,957	0,961	0,965	0,967
	$16\sqrt{2} \pi f_0$	0,804	0,875	0,907	0,924	0,936	0,944	0,950	0,955	0,959	0,962
	$32\pi f_0$	0,781	0,860	0,894	0,913	0,927	0,936	0,943	0,949	0,953	0,957
	$2\pi f_0$	0,944	0,968	0,977	0,982	0,985	0,987	0,989	0,990	0,991	0,992
	$2\sqrt{2} \pi f_0$	0,927	0,957	0,969	0,975	0,979	0,982	0,984	0,986	0,987	0,988
	$4\pi f_0$	0,911	0,947	0,961	0,969	0,974	0,978	0,980	0,982	0,984	0,985
	$4\sqrt{2} \pi f_0$	0,895	0,937	0,954	0,963	0,969	0,973	0,976	0,979	0,981	0,982

4	$8\pi f_0$	0,880	0,927	0,946	0,957	0,964	0,969	0,972	0,975	0,977	0,979
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,863	0,916	0,938	0,950	0,958	0,963	0,968	0,971	0,973	0,976
	$16\pi f_0$	0,844	0,903	0,928	0,942	0,951	0,958	0,962	0,966	0,969	0,972
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,824	0,889	0,918	0,934	0,943	0,951	0,957	0,961	0,964	0,967
	$32\pi f_0$	0,803	0,874	0,906	0,924	0,935	0,944	0,950	0,955	0,950	0,962

Магнитный канал с однозвенным RC -фильтром

0,5	$2\pi f_0$	0,939	0,964	0,975	0,980	0,983	0,985	0,987	0,989	0,990	0,991
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,919	0,953	0,965	0,972	0,977	0,980	0,982	0,984	0,986	0,987
	$4\pi f_0$	0,902	0,940	0,956	0,966	0,971	0,975	0,978	0,980	0,982	0,984
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,884	0,931	0,949	0,959	0,965	0,970	0,974	0,976	0,978	0,980
	$8\pi f_0$	0,869	0,920	0,941	0,952	0,960	0,965	0,969	0,971	0,974	0,977
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,849	0,907	0,931	0,944	0,953	0,959	0,964	0,968	0,970	0,972
	$16\pi f_0$	0,832	0,895	0,919	0,936	0,946	0,953	0,958	0,962	0,968	0,969
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,809	0,879	0,909	0,926	0,937	0,946	0,952	0,956	0,960	0,964
	$32\pi f_0$	0,789	0,865	0,896	0,915	0,929	0,937	0,945	0,950	0,954	0,958
	$2\pi f_0$	0,945	0,969	0,977	0,982	0,985	0,987	0,989	0,990	0,991	0,992
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,929	0,958	0,969	0,976	0,980	0,983	0,985	0,986	0,987	0,989
	$4\pi f_0$	0,914	0,949	0,962	0,969	0,975	0,979	0,981	0,983	0,985	0,986

f_{0r} z_{ik}	$\tau = RC,$ $сек$										
		h	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0,5√2	$4\sqrt{2} \pi f_0$	0,899	0,939	0,955	0,963	0,970	0,974	0,977	0,979	0,981	0,983
	$8\pi f_0$	0,882	0,928	0,946	0,959	0,964	0,969	0,972	0,976	0,978	0,980
	$8\sqrt{2} \pi f_0$	0,867	0,919	0,940	0,951	0,958	0,964	0,969	0,971	0,974	0,976
	$16\pi f_0$	0,848	0,906	0,930	0,943	0,953	0,958	0,963	0,967	0,970	0,972
	$16\sqrt{2} \pi f_0$	0,831	0,894	0,919	0,936	0,945	0,953	0,957	0,962	0,966	0,968
	$32\pi f_0$	0,808	0,879	0,909	0,926	0,936	0,945	0,952	0,956	0,960	0,963
1	$2\pi f_0$	0,953	0,973	0,981	0,985	0,987	0,989	0,990	0,992	0,992	0,993
	$2\sqrt{2} \pi f_0$	0,937	0,964	0,937	0,979	0,982	0,985	0,986	0,988	0,989	0,990
	$4\pi f_0$	0,923	0,955	0,968	0,974	0,978	0,981	0,983	0,985	0,987	0,987
	$4\sqrt{2} \pi f_0$	0,909	0,947	0,961	0,969	0,974	0,977	0,980	0,982	0,983	0,985
	$8\pi f_0$	0,897	0,938	0,954	0,963	0,969	0,973	0,976	0,979	0,981	0,982
	$8\sqrt{2} \pi f_0$	0,881	0,927	0,946	0,956	0,964	0,969	0,972	0,975	0,978	0,980
	$16\pi f_0$	0,866	0,918	0,939	0,951	0,958	0,964	0,968	0,971	0,974	0,976
	$16\sqrt{2} \pi f_0$	0,848	0,905	0,930	0,943	0,953	0,958	0,963	0,967	0,969	0,972
	$32\pi f_0$	0,830	0,891	0,919	0,936	0,945	0,953	0,957	0,962	0,965	0,967
	$2\pi f_0$	0,959	0,976	0,983	0,987	0,989	0,991	0,992	0,993	0,993	0,994
	$2\sqrt{2} \pi f_0$	0,945	0,967	0,977	0,982	0,985	0,987	0,988	0,990	0,991	0,991

$\sqrt{2}$	$4\pi f_0$	0,933	0,960	0,971	0,978	0,981	0,984	0,986	0,987	0,988	0,989
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,921	0,953	0,965	0,973	0,977	0,980	0,983	0,984	0,986	0,987
	$8\pi f_0$	0,908	0,944	0,960	0,968	0,973	0,977	0,980	0,981	0,983	0,985
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,896	0,937	0,954	0,963	0,969	0,973	0,976	0,979	0,980	0,982
	$16\pi f_0$	0,880	0,927	0,946	0,956	0,964	0,968	0,972	0,975	0,978	0,979
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,866	0,917	0,937	0,951	0,958	0,964	0,967	0,971	0,974	0,976
	$32\pi f_0$	0,847	0,905	0,929	0,943	0,952	0,958	0,963	0,966	0,969	0,972
	$2\pi f_0$	0,964	0,980	0,985	0,989	0,991	0,992	0,993	0,994	0,994	0,995
2	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,953	0,972	0,980	0,984	0,987	0,989	0,990	0,991	0,992	0,993
	$4\pi f_0$	0,940	0,966	0,975	0,980	0,984	0,986	0,987	0,989	0,990	0,991
	$4\sqrt{2}\pi f_0$	0,931	0,959	0,970	0,976	0,980	0,983	0,985	0,987	0,988	0,989
	$8\pi f_0$	0,920	0,952	0,965	0,972	0,977	0,980	0,982	0,984	0,986	0,987
	$8\sqrt{2}\pi f_0$	0,907	0,944	0,959	0,968	0,972	0,977	0,979	0,981	0,983	0,985
	$16\pi f_0$	0,895	0,936	0,953	0,962	0,969	0,972	0,976	0,979	0,980	0,982
	$16\sqrt{2}\pi f_0$	0,879	0,926	0,946	0,956	0,964	0,968	0,972	0,975	0,977	0,979
	$32\pi f_0$	0,865	0,915	0,937	0,950	0,958	0,964	0,967	0,971	0,974	0,976
	$2\pi f_0$	0,969	0,983	0,987	0,991	0,992	0,993	0,994	0,995	0,995	0,996
	$2\sqrt{2}\pi f_0$	0,958	0,976	0,983	0,986	0,989	0,990	0,992	0,992	0,993	0,994
	$4\pi f_0$	0,949	0,969	0,979	0,983	0,986	0,988	0,989	0,990	0,991	0,992

$\frac{f_0}{z_{11}}$	$\begin{matrix} \tau=RC, \\ \text{сек} \\ h \end{matrix}$	$\tau=RC, \text{сек}$									
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$2\sqrt{2}$	$4\sqrt{2} \pi f_0$	0,939	0,963	0,974	0,979	0,983	0,985	0,987	0,988	0,990	0,990
	$8\pi f_0$	0,928	0,958	0,970	0,976	0,980	0,982	0,985	0,986	0,988	0,988
	$8\sqrt{2} \pi f_0$	0,919	0,951	0,964	0,971	0,976	0,980	0,982	0,984	0,985	0,987
	$16\pi f_0$	0,906	0,943	0,958	0,967	0,972	0,976	0,979	0,981	0,983	0,984
	$16\sqrt{2} \pi f_0$	0,894	0,936	0,953	0,962	0,967	0,973	0,976	0,978	0,980	0,982
	$32\pi f_0$	0,879	0,926	0,945	0,956	0,963	0,968	0,972	0,975	0,978	0,979
4	$2\pi f_0$	0,973	0,985	0,989	0,992	0,993	0,994	0,995	0,995	0,996	0,996
	$2\sqrt{2} \pi f_0$	0,964	0,979	0,985	0,988	0,990	0,991	0,992	0,993	0,994	0,995
	$4\pi f_0$	0,955	0,974	0,981	0,985	0,988	0,989	0,991	0,992	0,992	0,993
	$4\sqrt{2} \pi f_0$	0,947	0,969	0,977	0,982	0,985	0,987	0,989	0,990	0,991	0,992
	$8\pi f_0$	0,938	0,963	0,973	0,979	0,982	0,985	0,987	0,988	0,989	0,990
	$8\sqrt{2} \pi f_0$	0,927	0,957	0,969	0,975	0,980	0,982	0,984	0,986	0,987	0,988
	$16\pi f_0$	0,918	0,951	0,964	0,971	0,976	0,979	0,982	0,984	0,985	0,986
	$16\sqrt{2} \pi f_0$	0,905	0,943	0,958	0,967	0,972	0,976	0,979	0,981	0,983	0,984
	$32\pi f_0$	0,891	0,936	0,953	0,962	0,967	0,972	0,976	0,978	0,980	0,982

**Данные элементов электрических схем аппаратуры
станция ГР42-1 (рис. 28)**

Обозначение	Наименование, тип	Основные данные	Кол-ч.	Примечание
R_1-R_3	Резистор МЛТ 0,5—5,1 $M \pm 5\%$	5,1 <i>МОм</i>	3	
R_4-R_6	» МЛТ 0,5—5,1 $M \pm 5\%$	1,5 <i>МОм</i>	3	
R_7-R_9	» МЛТ 0,5—5,6 $\kappa \pm 5\%$	5,6 <i>КОм</i>	3	
$R_{10}-R_{21}$	Катушка сопротивления кон- стант. (шунт к М-24 на 10 $ma \pm 1\%$)	—	3	Подбирается
$R_{13}-R_{15}$	Резистор МЛТ 0,5—200 $\pm 5\%$	200 <i>Ом</i>	3	
$R_{16}-R_{18}$	» МЛТ 0,5—1,0 $\pm 5\%$	1 <i>КОм</i>	3	
$R_{19}-R_{21}$	» МЛТ 0,5—300 $\pm 5\%$	300 <i>Ом</i>	3	
$R_{22}-R_{24}$	» 0,5—5,1 $M \pm 5\%$	30,6 <i>МОм</i>	18	Послед. соедин.
$R_{25}-R_{27}$	» МЛТ 0,5	5,6—16 <i>КОм</i>	3	Подбирается
$R_{28}-R_{30}$	» МЛТ 0,5	100—560 <i>КОм</i>	3	Подбирается
$R_{31}-R_{33}$	» МЛТ 0,5	300—820 <i>КОм</i>	3	Подбирается
$R_{34}-R_{36}$	» МЛТ 0,5	5,6—12 <i>КОм</i>	3	Подбирается
$R_{37}-R_{38}$	Потенциометр БТ4.685.001 СП	350 <i>Ом</i>	3	
$R_{40}-R_{42}$	» БТ4.685.022 СП	100 <i>Ом</i>	3	
$R_{43}-R_{45}$	Резистор МЛТ 0,5—5,1 $M \pm 5\%$	10,2 <i>МОм</i>	12	Послед. соедин.
$R_{49}-R_{51}$	» МЛТ 0,5—7,5 $\kappa \pm 5\%$	7,5 <i>КОм</i>	3	
$R_{52}-R_{54}$	» МЛТ 0,5—200 $\pm 5\%$	200 <i>Ом</i>	3	
R_{68}	Катушка сопротивления кон- стант (шунт к М-24 на 5 $ma \pm 1\%$)	—	1	Подбирается
R_{59}	Катушка сопротивления кон- стант. (шунт к М-24 на 10 $ma \pm 0,5\%$)	—	1	Подбирается
R_{60}	Потенциометр БТ4.685.022 СП	100 <i>Ом</i>	1	
$R_{61}-R_{70}$	Катушка сопротивления кон- стант., 5 $ом \pm 0,5\%$	5 <i>Ом</i>	10	
R_{71}	Сопротивление комбинирован- ное МЛТ 0,5 363 ± 1 <i>ом</i>	363 <i>Ом</i>	1	
R_{72}	Сопротивление комбинирован- ное МЛТ 0,5 117 $\pm 0,5$ <i>ом</i>	117 <i>Ом</i>	1	

Обозначение	Наименование, тип	Основные данные	Кол-во	Примечание
R73	Сопrotивление комбинированное МЛТ 0,5 193±0,5 ом	193 ом	1	
R74	» » МЛТ 0,5 386±1 ом	386 ом	1	
R75	» » МЛТ 0,5 1158±3 ом	1158 ом	1	
R76	» » МЛТ 0,5 2319±5 ом	2319 ом	1	
R77	» » МЛТ 0,5 6954±15 ом	6954 ом	1	
R78	» » МЛТ 0,5 11580±30 ом	11580 ом	1	
R79	» » МЛТ 0,5 23210±50 ом	23210 ом	1	
R80	» » МЛТ 0,5 46300±100 ом	46300 ом	1	
R82	Катушка сопротивления констант. 100±0,5 ом	100 ом	1	
R83	Сопrotивление комбинированное МЛТ 0,5 500 к ± 1%	500 ком	1	
R84—R87	» МЛТ 0,5 12,2 к ± 1%	12,2 ком	4	
R88—R90	Резистор МЛТ 0,5—100 ± 5%	100 ом	3	
R91—R93	Катушка сопротивления констант. 20 ом ± 0,5%	20 ом	3	
R94—R96	Резистор МЛТ 0,25—47 ± 5%	47 ом	3	
R97—R99	» МЛТ 0,5—100 ± 5%	100 ом	3	
R100—R102	» МЛТ 0,5—200 ± 5%	200 ом	3	
R103—R105	» МЛТ 0,5—360 ± 5%	360 ом	3	
R106	Катушка сопротивления констант. 1,02 ом ± 0,25%	1,02 ом	1	
R107—R108	Резистор МЛТ 0,25—47 ± 5%	47 ом	2	
R109—R110	» МЛТ 0,5—100 ± 5%	100 ом	2	
R111—R112	» МЛТ 0,5—200 ± 5%	200 ом	2	
R113—R114	» МЛТ 0,5—360 ± 5%	360 ом	2	
R115—R116	» МЛТ 0,5—750 ± 5%	750 ом	2	
R117—R118	Потенциометр БТ4.685.065 СП	5 ом	2	
R119—R122	Резистор МЛТ 0,5—100 ± 5%	100 ом	4	
R123—R126	» МЛТ 0,5—150 ± 5%	150 ом	4	
R129—R130	Потенциометр БТ4.685.065 СП	25 ом	2	
R131—R132	Резистор МЛТ 0,5—1,5 к ± 5%	1,5 ком	2	
R133	» МЛТ 0,5—1,0 М ± 5%	10,0 МОм	10	Послед. соедин.
R134	Сопrotивление СП-1-ОС-3А	470 ком	1	

Обозначение	Наименование, тип	Основные данные	Кол-во	Примечание
R_{135}	Сопротивление ППЗ-11-1,5 к	1,5 ком	1	
R_{136}	Резистор МЛТ 0,5-200 $\pm 5\%$	200 ом	1	
$R_{137}-R_{138}$	Сопротивление БТ.685.006 25 ом, 30 вт	25 ом	2	
C_1-C_3	Конденсатор МБМ-160-0,5	0,5 мкф	3	
C_4-C_9	» МБГО-2-160-10	10 мкф	6	
$C_{10}-C_{14}$	» ЭГЦ-а-6/700-М	700 мкф	5	
C_{15}	» ЭМ-10-30-М	60 мкф	2	Пара л. соед.
$C_{16}-C_{17}$	» ЭГЦ-а-6/1000-М	1000 мкф	2	
L_1-L_6	Лампа 2П2П		6	
O_1	Осветительная лампа спец. (п/л МН-4) 2,5 в, 0,2-0,4 а		1	
O_2-O_3	Осветительная лампа МН-3 2,5 в, 0,16 а		2	
P_1-P_3	Переключатель ПГК-2П8Н-8А		3	
P_4-P_7	» ПГК-5П2Н-8А		4	
P_8	» ПГК-5П8Н-8А		1	
P_9	Ключ телефонный роликовый		1	
$P_{10}-P_{11}$	Переключатель ПГК-11П2Н-8А		2	
P_{12}	» ПГК-5П6Н-8А		1	
$P_{13}-P_{14}$	» ПГК-5П2Н-8А		2	
BK_1-BK_3	Тумблер ТВ-2-1		3	
BK_4	» двухполюсный ТП-1-2		1	
BK_5-BK_7	ТВ-2-1		3	
K	Кнопка командная		1	
$Ш_1-Ш_4$	Разъем штепсельный РША- ВП-14 (РША-ВК-14)		4	
$И_1$	Микроамперметр М-24 0-100 мка		1	
$\Gamma_{гр}$	Градуировочный генератор		1	
D	Двигатель 6 в, 6 вт		1	
P_1-P_2	Реле РП-5, РС4. 522.000 СП		2	
$\Delta V_1, \Delta V_2, K\psi$	Клемма приборная		6	

Обозначение	Наименование, тип	Основные данные	Кол-во.	Примечание
$\Gamma_H, \Gamma_D, \Gamma_Z,$ $\Gamma_{E_1}, \Gamma_{E_2}, \Gamma_{оп}$	Гальванометр магнитоэлектрический С = 10^{-8} а/мм/м		6	
КА	Катушка 2×30 витков			
ОС	» 2×30 »			
КН	» 2×30 »			
КС	» 2×50 »			
З	» 1×500 »			
ГР	» 2×1 »			
Б ₁ —Б ₇	Элемент «Сатурн»		7	
Б ₈	Элемент РЦ-85		4	Послед. соед.
Б _Н —Б _С	Аккумулятор 2НКН-24		4	
Б _Ф	Батарея 220-ПМЦГ/315-ПМЦГ 80 ч.		1	
Б _а	Батарея анодная 70 в, 2—10 а.ч.		1	
Н, D, Z	Магнитостатический датчик		3	

Станция ГГ42-2 (рис. 33)

R ₁ —R ₃	Резистор МЛТ 0,5—8,2 к ± 5%	8,2 КОМ	3	
R ₄ —R ₆	» МЛТ 0,5—1,6 к ± 5%	1,6 КОМ	3	
R ₇ —R ₉	» КЛМ 0,25—10 М ± 5%	30 МОМ	9	Послед. соед.
R ₁₀ —R ₁₂	» МЛТ 0,5	100—560 Ом	3	Подбирается
R ₁₃ —R ₁₅	» МЛТ 0,5	5,6—12 КОМ	3	Подбирается
R ₁₆ —R ₁₈	» МЛТ 0,5	0—10 КОМ	3	»
R ₁₉ —R ₂₁	» МЛТ 0,5	10—100 КОМ	3	»
R ₂₂ —R ₂₄	» МЛТ 0,5	0,1—2,0 МОМ	3	»
R ₂₅ —R ₂₇	» МЛТ 0,5	36—100 КОМ	3	»
R ₂₈	» МЛТ 0,5—200 к ± 5%	200 КОМ	1	
R ₂₉	» МЛТ 0,5—1,2 М ± 5%	1,2 МОМ	1	
R ₃₀	» МЛТ 0,5	100—150 КОМ	1	Подбирается
R ₃₁ —R ₃₃	» МЛТ 0,5—5,6 к ± 5%	5,6 КОМ	3	
R ₃₄ —R ₃₆	» МЛТ 0,5	1,2—5,6 КОМ	3	Подбирается
R ₃₇ —R ₃₉	Потенциометр БТ4.685.5 к	5 КОМ	3	

Обозначение	Наименование, тип	Основные данные	Кол-во	Примечание
<i>R₄₀—R₄₂</i>	Сопrotивление комбинированное МЛТ 0,5; 15,6 $M \pm 5\%$	15,6 <i>Мом</i>	3	
<i>R₄₃—R₄₈</i>	Резистор МЛТ 0,5-10 $M \pm 5\%$	10 <i>Мом</i>	6	
<i>R₄₉—R₅₄</i>	» МЛТ 0,5-10 $\kappa \pm 5\%$	10 <i>ком</i>	6	
<i>R₅₅—R₆₀</i>	» МЛТ 0,5-10 $M \pm 5\%$	10 <i>Мом</i>	6	
<i>R₆₁—R₆₈</i>	Сопrotивление констант. 0,0125 $ом \pm 5\%$	0,0125 <i>ом</i>	8	
<i>R₆₉</i>	Резистор МЛТ 0,5-5 $M \pm 1\%$	5 <i>Мом</i>	1	Подбирается
<i>R₇₀</i>	» МЛТ 0,5-500 $\kappa \pm 1\%$	500 <i>ком</i>	1	"
<i>R₇₁</i>	» МЛТ 0,5-49,3 $\kappa \pm 1\%$	49,3 <i>ком</i>	1	"
<i>R₇₂</i>	Сопrotивление проволочное (констант.), шунт к М-24 на 2 <i>ма</i>		1	"
<i>R₇₃</i>	Сопrotивление проволочное (констант), шунт к М-24 на 500 <i>ма</i> $\pm 1\%$		1	
<i>R₇₄</i>	» » шунт к М-24 на 10 <i>ма</i> $\pm 5\%$		1	
<i>R₇₅</i>	Потенциометр БТ4.685.022 СП	100 <i>ом</i>	1	
<i>R₇₆</i>	Резистор МЛТ 0,5—100 $\pm 0,5\%$	100 <i>ом</i>	1	Подбирается
<i>R₇₇</i>	Сопrotивление комбинированное МЛТ 0,5—253,6 $\pm 0,5$ <i>ом</i>	253,6 <i>ом</i>	1	Подбирается
<i>R₇₈</i>	» » МЛТ 0,5—362 $\pm 0,5$ <i>ом</i>	362 <i>ом</i>	1	"
<i>R₇₉</i>	» » МЛТ 0,5—724 ± 1 <i>ом</i>	724 <i>ом</i>	1	"
<i>R₈₀</i>	» » МЛТ 0,5—1148 ± 2 <i>ом</i>	1148 <i>ом</i>	1	"
<i>R₈₁</i>	» » МЛТ 0,5—2896 ± 5 <i>ом</i>	2896 <i>ом</i>	1	"
<i>R₈₂</i>	» » МЛТ 0,5—5790 ± 10 <i>ом</i>	5790 <i>ом</i>	1	"
<i>R₈₃</i>	» » МЛТ 0,5—11580 ± 20 <i>ом</i>	11580 <i>ом</i>	1	"
<i>R₈₄</i>	» » МЛТ 0,5—23160 ± 40 <i>ом</i>	23160 <i>ом</i>	1	"
<i>R₈₅—R₈₉</i>	Сопrotивление проволочное (констант.), 11,58 $\pm 0,5\%$	11,58 <i>ом</i>	5	"
<i>R₉₀—R₉₂</i>	Потенциометр БТ4.685.221 СП	350 <i>ом</i>	3	"
<i>R₉₃—R₉₅</i>	Резистор МЛТ 0,5-1,6 $\kappa \pm 5\%$	1,6 <i>ком</i>	3	
<i>R₉₆—R₁₀₁</i>	» МЛТ 0,5-360 $\pm 5\%$	360 <i>ом</i>	6	
<i>R₁₀₂—R₁₀₄</i>	Сопrotивление ВС-0,5—22 $\pm 10\%$	22 <i>ом</i>	3	

Обозначение	Наименование, тип	Основные данные	Кол-во	Примечание
$R_{105}-R_{107}$	Сопротивление ВС-0,5—36±5%	36 ом	3	
$R_{108}-R_{110}$	Резистор МЛТ 0,5-68 ±5%	68 ом	3	
$R_{111}-R_{113}$	» МЛТ 0,5-130 ±5%	130 ом	3	
$R_{114}-R_{116}$	» МЛТ 0,5-270 ±5%	270 ом	3	
$R_{117}-R_{118}$	» МЛТ 0,5-6,8 к ±5%	6,8 ком	2	
$R_{119}-R_{120}$	» МЛТ 0,5-1,8 к ±5%	1,8 ком	2	
$R_{121}-R_{122}$	» МЛТ 0,5-590 к ±5%	590 ом	2	
$R_{123}-R_{124}$	» МЛТ 0,5-300 ±5%	300 ом	2	
$R_{125}-R_{126}$	» МЛТ 0,5-1 к ±5%	1 ком	2	
$R_{127}-R_{128}$	Потенциометр 7388, 25 ом	25 ом	2	
$R_{129}-R_{130}$	» БТ4.685.0 78, 5 ом	5 ом	2	
$R_{131}-R_{138}$	Резистор МЛТ 0,5-130 ±5%	130 ом	8	
C_1-C_3	Конденсатор МБМ-160—0,5	0,5 мкф	3	
C_4-C_6	» МБГО-160—4,0	4 мкф	3	
C_7-C_{11}	» ЭГЦ-а-6/700-М	700 мкф	3	
L_1-L_9	Лампа 2П2П		9	
$\Phi_1-\Phi_3$	Фотоумножитель ФЭУ-2		3	
O_1	Осветительная лампа, специальная (шп МН-4)		1	
I	Микроамперметр М-24, 0—100 мкА		1	
$П_1$	Штепсельная колодка РША-14		2	
$П_2-П_4$	Переключатель ПГК-2П8Н-8А		3	
$П_5$	» ПР-15-5-8		1	
$П_6$	» ПР-15-3-8		1	
$П_7$	Ключ телефонный роликовый		1	
$П_8$	Переключатель ПР-15-1-8		1	
$П_9$	» ПГК-5П4Н-8А		1	
$П_{10}-П_{14}$	» ПР-15-1-5		5	
$Ш_1$	Разъем РША-ГП-20/РША-ВК-20		1	
$Ш_2-Ш_3$	» РША-ГП-14/РША-ВК-14		2	
$ВК_1-ВК_3$	Тумблер ТВ2-1		3	
$ВК_4$	Тумблер ТП1-2		1	

Обозначение	Наименование, тип	Основные данные	Кол-во	Примечание
<i>Б_А</i>	Аккумуляторная батарея 32АКН 2,25 М	42 в	1	
<i>Б_Н</i>	Аккумулятор 2НКН 24	2,5 в	4	
<i>Б_Ф</i>	Батарея 225 ПМЦГ/315ПМЦГ	220 в	1	
<i>Б₁—Б₃</i>	Элемент «Сатурн», «Марс»	1,6 в	3	
<i>Е₁—Е₂</i>	Клемма приборная КП-10		4	
<i>Г_р</i>	Катушка 2×1 витка			
<i>КА</i>	» 2×100 витков			
<i>КН</i>	Катушка 2×50 витков			
<i>ОС</i>	Катушка 2×100 витков			
<i>Э</i>	Катушка 1×1000 витков			

Осциллограф ЭПО-9

<i>R₁</i>	Резистор МЛТ 0,5-2,7 к ±5%	2,7 ком	1	
<i>R₂</i>	» МЛТ 0,5-100 ±5%	100 ом	1	
<i>R₃—R₄</i>	Сопротивление БТ4.685.006 25 ом, 30 вт	25 ом	2	
<i>R₅</i>	Резистор МЛТ 1,0-100 ±5%	100 ом	1	
<i>C₁</i>	Конденсатор К-50-3-6/5000	5000 мкф	1	
<i>C₂—C₄</i>	» МБГО-160-1,0	1 мкф	3	
<i>P₁</i>	Реле РП-5		1	
<i>Л₁—Л₃</i>	Лампа осветительная МН-1, МН-2		2	
<i>Л₂</i>	Лампа осветительная СЦ-79		1	
<i>М</i>	Электродвигатель 12 в, 10 вт		1	
<i>КЧ</i>	Контактные часы АЧХ		1	
<i>В. КЧ</i>	Клеммы внешних контактных часов			
<i>И</i>	Вольтметр		1	
<i>П₁—П₂</i>	Переключатель ТП-2		2	
<i>Т₁—Т₉</i>	Тумблер ТВ2-1		9	
<i>Б_М</i>	Аккумулятор 6—12 в, 45—100 а. ч.		1	

Обозначение	Наименование, тип	Основные данные	Кол-ч.	Примечание
B_0	Аккумулятор 2НГН 24		1	
$Ш_1—Ш_3$	Разъем РША-ВК-6/РША-ГП-6		3	
$\Gamma_H, \Gamma_D, \Gamma_Z,$ $\Gamma_{E_1}, \Gamma_{E_2}$	Гальванометр магнитоэлектрический $C_1=10^{-8}$ а/мм/м		5	
Эталонировочное устройство для ГГ42-2 (рис. 34)				
R_1	Резистор МЛТ 0,5	16—30 ком	1	Подбирается
R_2	» МЛТ 0,5—1,2 М	1,2 Мом	1	
R_3	» КЛМ 0,25—10,0 М ± 10%	30 Мом	3	Соед. послед.
R_4	» МЛТ 0,5—10,0 к ± 5%	10 ком	1	
R_5	Сопротивление проволочное, шунт к М109 на 5 ма		1	
R_6	Резистор МЛТ 0,5—30 к ± 5%	30 ком	1	
R_7	» МЛТ 0,5—16 к ± 5%	16 ком	1	
R_8	» МЛТ 0,5—2,4 к ± 5%	2,4 ком	1	
R_9	» МЛТ 0,5—750 ± 5%	750 ом	1	
R_{10}	Сопротивление ВТ 5 к ± 10%	5 ком	1	
$R_{11}—R_{15}$	Сопротивление проволочное (констант.) 2,0 ± 0,005 ом	2 ом	5	
R_{16}	Резистор МЛТ 0,5—510 ± 5%	510 ом	1	
$ПЛК-7$	Ламповая панель		1	
M	Микроамперметр М109, 50—100—500—1000 мка		1	
$П_1$	Переключатель ПР-15-2-5		1	
$П_2$	Ключ телефонный роликовый		1	
$П_3$	Переключатель ПР-15-1-5		1	
T_1	Тумблер ТВ2-1		1	
T_2	» ТП1-2		1	
I, V	Клемма приборная		3	
$Ш$	Разъем РША-ГП-14 (РША-ВК-14)		1	
B	Элемент «Сатурн»		1	

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Алексеев, М. Н. Бердичевский, Е. А. Ланцов. Магнитотеллурическая лаборатория МТЛ-62. Госгеолком, СССР, ВНИИ Геофизика, 1963.
2. А. М. Алексеев. Аппаратура для электроразведки методом теллурических токов. М., Гостоптехиздат, 1959.
3. А. А. Авагимов, В. Г. Дубровский. Фотоэлектрическая регистрация длиннопериодных вариаций геомагнитного поля.— Изв. АН СССР, серия физ. техн. хим. и геол., № 6, 1969.
4. С. П. Бакалинский, Б. Е. Брюнелл, Н. Ф. Кротович. Регистрация магнитных пульсаций высокочувствительным магнитометром.— Инф. бюлл. МГГ, № 7, 1959.
5. Б. Н. Бегунов. Геометрическая оптика. Изд. моск. ун-та, 1961.
6. М. Н. Бердичевский. Электрическая разведка методом теллурических токов. М., Гостоптехиздат, 1960.
7. М. Н. Бердичевский, Б. Е. Брюнелл. Теоретические предпосылки магнитотеллурического профилирования.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1959, № 7.
8. М. Н. Бердичевский, А. М. Алексеев. Электроразведка методом земных токов.— Прикладная геофизика, вып. 8, 1952.
9. М. Н. Бердичевский. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М., «Недра», 1967.
10. В. Н. Бобров. Универсальный, высокостабильный чувствительный элемент с нулевым температурным коэффициентом для магнитометров. Тр. ИЗМИРАН, вып. 18/28, 1961.
11. В. Н. Бобров. Магниты с нулевыми температурными коэффициентами.— Геомагнетизм и Аэронавтика, 1965, № 5.
12. А. М. Бонч-Бруевич. Радиоэлектроника в экспериментальной физике. М., «Наука», 1966.
13. Н. Д. Босый. Электрические фильтры. ГИТТЛ УССР, 1960.
14. Е. С. Борисевич. Универсальные регистрирующие приборы. Л., 1965.
15. И. Брейдо. Фотоэлектронные умножители.— Радио, 1956, № 7.
16. Б. Е. Брюнелл. Геомагнитные вариации и их использование при проведении магнитотеллурических работ. Докт. дисс. 1965.
17. Б. Е. Брюнелл, Д. А. Низяев. Магнитограф с видимой записью.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1957, № 8.
18. Б. Е. Брюнелл, М. Н. Бердичевский, А. М. Алексеев, О. А. Бурдо. Наблюдения короткопериодных вариаций электромагнитного поля Земли.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1959, № 8.

19. Б. Е. Брюнелли, Д. А. Нязяев, Х. Д. Канониди. Стабилизатор магнитного поля.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1957, № 7.
20. Л. Л. Ваньян, Н. Ф. Кротевич. Влияние резких геоэлектрических неоднородностей на КПК геомагнитного поля. Сб. «Геомагнитные исследования», № 9, «Наука», 1967.
21. А. К. Вейнберг. Об оптимальных размерах и форме магнитов для астатических систем. Тр. ВСЕГЕИ, № 105, 1964.
22. Вэй Цинь-юнь. Высокочувствительный магнитометр для регистрации КПК магнитного поля Земли в диапазоне частот 0,1—10 гц.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 7.
23. Г. В. Войшвилло. Усилители низкой частоты на электронных лампах. Связьиздат, 1963.
24. А. Ф. Выдрин. Высокочувствительный фотоэлектрический магнитометр для метода магнитотеллурического профилирования.— Изв. АН Туркм. ССР, серия физ. техн. хим., геол. наук, вып. 1, 1961.
25. М. Ф. Гарднер, Дж. Л. Барнс. Переходные процессы в линейных системах. М., 1961.
26. В. Гартман, Ф. Беригард. Фотоэлектронные умножители. Госэнергоиздат, 1961.
27. Р. С. Гутер, А. Р. Ямпольский. Дифференциальные уравнения. Физматгиз, 1962.
28. Н. А. Денискин, Ю. М. Егоров, Н. В. Липская, С. В. Осипская, Г. В. Хересько, В. Ф. Шельтинг. Кварцевая микровариационная станция. Результаты МГГ, геомагнетизм, № 2, 1960.
29. Н. А. Денискин, Ю. М. Егоров, Н. В. Липская. Кварцевая полевая микровариационная станция.— Геофиз. приборостроение, 1960, № 7.
30. Ю. М. Егоров. К вопросу о регистрации вариации геомагнитного поля в диапазоне частот 0,1—10 гц.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1962, № 5.
31. Ю. М. Егоров, С. В. Осипская, В. Г. Черноземова. Установка для регистрации колебаний геомагнитного поля в широком диапазоне частот.— Геофиз. аппаратура, 1966, № 29.
32. Н. И. Идельсон. Теория потенциала. ОНТИ, 1936.
33. А. Г. Калашников. Флюксметр. М., Изд. АН СССР, 1949.
34. Х. Д. Канониди, В. Н. Бобров. Дистанционный магнитометр с видимой записью системы ИЗМИРАН.— Геомагнетизм и аэронавигация, 1965, № 6.
35. К. Б. Карандеев. Гальванометры постоянного тока. Л., Изд. Львовского ун-та, 1957.
36. К. Б. Карандеев. Методы электрических измерений. Госэнергоиздат, 1952.
37. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений, ГИТЛ УССР, 1953.
38. К. Б. Карандеев, Л. Я. Мизюк, Г. А. Штамбергер. Автоматический электронный компенсатор с высоким входным сопротивлением. Докл. конф. по компенсационным методам измерений. Львов, 1955.
39. А. А. Кауфман. Об амплитудных и фазовых характеристиках, применяемых в низкочастотной электроразведке.— Изв. вузов. Геология и разведка, 1960, № 6.
40. Кин Н. Тонг. Теория механических колебаний. М., Машгиз, 1963.
41. А. А. Ковтун, О. М. Распопов. Об аппаратуре для магнитотеллурического зондирования.— Геофиз. приборостроение, вып. 8, 1961.
42. А. П. Краев. Основы геоэлектрики. М., «Недра», 1965.

43. Е. С. Кричевский, Л. Г. Федорович, В. Ф. Фетисов. Электрооборудование оптико-механических приборов. Изд. обор. промышленности, 1957.
44. Н. Ф. Кротевич. Магнитная трехкомпонентная микровариационная станция для полевых наблюдений.— Геомагнетизм и аэрономия, 1963, № 4.
45. Н. Ф. Кротевич. Полевая микровариационная станция и ее применение в геофизических исследованиях. Геофизическое приборостроение, вып. 20, «Недра», 1964.
46. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Госэнергониздат, 1948.
47. Л. Ф. Куликовский, Ю. И. Видманов. Фотоэлектрический усилитель и его использование.— Изв. вузов. Приборостроение, 1958, № 5.
48. Н. В. Липская, Н. А. Денискин, Ю. М. Егоров, В. Ф. Шельтинг. Стационарная микровариационная станция с электронным усилением.— В сб. «Возмущения электромагнитного поля», № 2, 1960.
49. Н. В. Липская. Колебания подвижного магнита кварцевого микровариометра, находящегося в поле колец Гельмгольца обратной связи. Сб. «Вопросы теории и практики электрометрии». М., Изд. АН СССР, 1962.
50. Е. А. Луковский. Основы оптики. Начала светотехники. Оборонгиз, 1949.
51. С. М. Мансуров. Теория магнитных вариационных приборов. Тр. НИИЗМ, вып. 12 (22), 1957.
52. С. М. Мансуров. О причинах локальности геомагнитных вариаций в районе Мирного.— Инф. Бюлл. Сов. Антаркт. эксп. № 2, 1958.
53. Э. Мейер, К. Мердер. Зеркальные гальванометры и приборы со световым указателем. ИЛ, Госэнергониздат, 1959.
54. А. П. Молчанов. Курс электротехники и радиотехники. Физматгиз, 1961.
55. С. М. Пигин. Выбор длины растяжек.— Измерительная техника, 1961, № 2.
56. С. Г. Рабинович. Фотогальванометрические компенсационные приборы. М., «Энергия», 1964.
57. О. М. Распопов, Н. Д. Чичерина. Опыт регистрации вариаций геомагнитного поля с периодом менее 5 секунд.— Геомагнетизм и аэрономия, 1964, № 3.
58. Н. В. Розе, Н. И. Трубяччинский, Б. М. Яновский. Земной магнетизм и магнитная разведка. ОНТИГТТИ, 1934.
59. И. И. Рокитянский. Береговой эффект, наблюдаемый в вариациях электромагнитного поля Земли.— Изв. АН СССР, серия геофиз. 1963, № 12.
60. В. П. Самойленко. Высокочувствительный Н-магнитометр. Сб. «Электромагнитные зондирования и магнитотеллурические методы». Изд. ЛГУ, 1963.
61. Б. А. Селибер, С. Г. Рабинович. Фотокомпенсационные усилители постоянного тока.— Автоматика и телемеханика, 1956, № 8.
62. П. К. Сенько. Береговой эффект в магнитных вариациях. Инф. бюлл. Советской Антарктич. эксп. № 4, 1959.
63. В. П. Смирнов. Курс высшей математики. т. 11, Физматгиз, 1951.
64. С. П. Стрелков. Механика. ГИИТЛ, 1956.
65. В. В. Суходольский. 48-канальный осциллограф ОМС-М. АН СССР, филиал ВИНТИ, 1959.

66. И. И. Теумпн. Справочник по переходным процессам. Связьиздат, 1951.
 67. В. А. Троицкая. Короткопериодические возмущения электромагнитного поля Земли.— Докл. АН СССР, т. 91, 1959, № 2.
 68. В. А. Троицкая. Колебания типа биений (жемчужины) в электромагнитном поле Земли. Рез-ты МГГ, Геомагнетизм, 1961, № 3.
 69. А. И. Тудоровский. Теория оптических приборов, т. I, 1948.
 70. П. Б. Усатиц. О расчете растяжек для подвижных частей электроизмерительных приборов.— Измерительная техника, 1961, № 2.
 71. В. М. Фрейд. Пьезоэлектрический способ гальванометрической регистрации. Тр. ИФЗ АН СССР № 35 (202), 1964.
 72. Н. О. Чечик. Фотоэлементы и их применение. Госэнергоиздат, 1955.
 73. Н. О. Чечик, С. М. Файнштейн, Т. М. Лифшиц. Электронные умножители. ГИИТЛ, 1957.
 74. В. Ф. Шельтинг. Универсальная крутильная рамка для микроваппометров. Тр. НИИЗМИР, № 11 (24). Гидрометеиздат, 1955.
 75. В. Ф. Шельтинг. Кварцевый Z-магнитометр. Тр. НИИЗМИР, вып. 7, 1953.
 76. Е. Г. Шрамков. Электрические и магнитные измерения, 1937.
 77. Б. М. Яновский. Магнитографы. Тр. ВНИИМ, вып. 18 (34), т. 167, 1938.
 78. Б. М. Яновский. Теория варпацционных приборов. Гидрометеиздат, 1938.
 79. Б. М. Яновский. Земной магнетизм, ч. 11, Изд. ЛГУ, 1964.
 80. Geomagnetismus und Aeronomie. Bd. II, Veb Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1960.
 81. Merz L. Theorie der selbstkompensierenden Gleichstromverstärkender mechanischer Steuerung. «Archiv für Elektrotechnik», Bd. 31, H 1, 1937.
 82. Blackett P. M. S. A Negative experiment relation to magnetism and the earth's rotation. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serie A, N 897, vol. 245, 1952.
 83. Bell W., Bloom A. Phys. rew., 107, 1957, p. 1559.
 84. Bloom A. Phys. rew., 118, 1960, p. 664.
 85. Skillman T., Bender P. J. geophys. res., 63, 1958, p. 513.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Часть первая	
Основы измерений слабых вариаций магнитного поля магнитостатическим методом	
Глава I. Основы магнитостатического метода измерения слабых магнитных полей	
Принцип работы магнитометра с фотоэлектри- ческим преобразованием	7
Способы стабилизации магнитометров с фото- электрическим преобразованием	10
Основные конструктивные элементы микрова- риометров и требования, предъявляемые к ним	13
Чувствительность микровариометров	16
Пороговая чувствительность микровариометров	18
Глава II. Стабилизирующие устройства магнитометров с фотоэлектрическим преобразованием	
Обратная связь по магнитному полю	25
Демпфирование микровариометра	31
Дрейф нулевого отсчета и способы его умень- шения	34
Глава III. Частотные и переходные характеристики маг- нитных микровариометров	
Частотные свойства микровариометров	42
Переходные и частотные характеристики в основном измерительном звене микровариометра	45
Переходные процессы и частотные характерис- тики фильтра КПК	51
Суммарные переходные и частотные характерис- тики микровариометра	55
Глава IV. Элементы расчета конструкции трехкомпонент- ной микровариационной установки	
Расчет взаимного влияния подвижных магнитов датчиков	63
Расчет влияния поля рассеяния катушек на магнитные датчики	68
Оптическая система трехкомпонентных магни- тометров с фотоэлектрическим преобразованием	73

Глава V. Характеристики датчиков и гальванометров, применяемых в микровариационных приборах	
Магнитостатические датчики	79
Стабильность магнитостатических датчиков	82
Температурная компенсация датчиков	84
Характеристики регистрирующих гальванометров	88

Часть вторая

Аппаратура для микровариационных измерений

Глава VI. Электрические схемы и конструкции микровариационных станций типа ГГ42.	
Требования к конструкциям микровариационных приборов магнитостатического типа	95
Блок-схема микровариационной станции ГГ42	99
Микровариационная станция ГГ42-1. Электрическая схема	100
Конструкция магнитостатических датчиков	108
Устройство блока магнитных датчиков	113
Пульт управления и контроля	117
Гальванометрический осциллограф	120
Блок питания, эталонировочное и другие вспомогательные устройства	121
Микровариационная станция ГГ42-2. Электрическая схема	122
Конструкция станции	130
Глава VII. Эксплуатация, настройка и техническое обслуживание аппаратуры	
Основные требования к эксплуатации и транспортировке станции ГГ42	140
Установка станции	145
Включение	147
Регистрация естественных электромагнитных полей	152
Характерные неисправности станции ГГ42	158
Настройка основных узлов станции ГГ42	159
Результаты испытаний и возможность применения аппаратуры в геофизических исследованиях	164
Глава VIII. Экспериментальное определение параметров аппаратуры	
Определение параметров, характеризующих переходные и частотные свойства магнитного канала	169
Способы определения цены деления измерительных каналов	171
Эталонирование измерительных каналов	173
Практические частотные характеристики магнитных каналов	175
Амплитудные характеристики магнитных каналов	178
Исследование источников внутренних шумов	179
Изучение суммарного дрейфа нуля в магнитных каналах	182
Определение полярности измерительных каналов	185

Определение температурных коэффициентов магнитостатических датчиков	185
Измерение температурных коэффициентов постоянных магнитов	188
Определение постоянных для катушек типа колец Гельмгольца	189

Приложения (таблицы)

Таблица I	193
Таблица II	193
Таблица III	194
Таблица IV	195
Таблица V	197
Таблица VI	199
Таблица VII	202
Таблица VIII	213
Литература	221



Николай Феликсович Кротевич
МАГНИТНЫЕ
МИКРОВАРИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
И АППАРАТУРА
ДЛЯ МАГНИТО-ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Ответственный редактор
доктор технических наук
Г. А. Штамберг

Редактор Л. В. Шалина
Художественный редактор В. И. Шумаков
Обложка художника И. Е. Вяткина
Технический редактор Е. М. Елистратова
Корректоры Н. Н. Тясто, М. П. Фомина

Сдано в набор 21 июля 1971 г. Подписано к печати 12 апреля 1972 г. МН 01019.
Формат бумаги 60×90¹/₁₆. 14,25 печ. л. + 3 вкл. 12,1 уч.-изд. л.
Тираж 750 экз. Заказ № 68. Цена 1 р. 21 к.

Издательство «Наука», Сибирское отделение. Новосибирск-99, Советская, 18.
4-я типография издательства «Наука». Новосибирск-77, Станиславского, 25.