

DOI 10.58351/2949-2041.2026.38.9.005

УДК 550.380.87

**Белов Борис Александрович**, старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН) Российской академии наук

**Любимов Владимир Валерьевич**, старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН) Российской академии наук

## **К ВОПРОСУ О ПРАКТИЧЕСКИ РЕАЛИЗУЕМОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СОВРЕМЕННЫМ ЦИФРОВЫМ КВАРЦЕВЫМ МАГНИТОМЕТРОМ ИСХОДЯ ИЗ ПРИНЯТОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ ЧАСТЕЙ ПРИБОРА. ЗАМЕТКИ РАЗРАБОТЧИКА**

**Аннотация.** Работа посвящена некоторым тонкостям и особенностям, которые сопровождают разработчиков магнитометрической аппаратуры на основе кварцевых магнитных датчиков при создании приборов, их настройке согласно необходимым требованиям и реализации максимально возможной точности измерений с их помощью магнитного поля.

**Ключевые слова:** Магнитное поле, магнитометр, магнитные измерения, магнитовариационная станция, магнитоизмерительный преобразователь, кварцевый магнитный датчик, точность измерения.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современный цифровой кварцевый магнитометр (или цифровая магнитовариационная станция – ЦМВС), на примере созданных в ИЗМИРАН в последние годы серийных приборов типа «Кварц-3» и «Кварц-4», – представляет собой систему с замкнутой петлей отрицательной обратной связи (ООС) по магнитному полю (МП) [1-9]. Такое преобразование называется еще «преобразованием недокомпенсации», поскольку часть магнитного сигнала остается некомпенсированной и угол поворота магнита с зеркалом – ненулевым. В этом случае глубину обратной связи (ОС) можно определить как отношение недокомпенсированной части сигнала к самому сигналу. Приблизительно глубина ОС определяется как отношение квадрата собственной частоты датчика без ОС (при обычной чувствительности это около 1 Гц) к квадрату частоты датчика в кольце ОС. Фактически, собственную частоту датчика можно довести до 100 Гц и даже выше (200...300 Гц), но при этом датчик воспринимает 50 Гц как полезный сигнал, а его амплитуда очень высока и забивает естественные вариации МП. В связи с этим датчики серии магнитометров «Кварц-3 и 4» были настроены на частоту 30...35 Гц и глубина ОС была равна примерно 1000. Это значит, что все внутренние шумы магнитометра, приведенные к выходу, уменьшаются в 1000 раз. При универсальном диапазоне  $\pm 5000$  нТл и предельной чувствительности 0,01 нТл суммарный шум магнитометра, приведенный к выходу, – не должен превышать  $2 \cdot 10^{-6}$  максимальной амплитуды сигнала, – или 5 нТл. В том случае, когда речь идет о шумах, пропорциональных полезному сигналу, вполне достаточно иметь точность 0,1 % измеряемого сигнала. Это означает, что все элементы цепи ОС можно использовать, если их стабильность не хуже 1%. Это относится главным образом к дрейфовым шумам таким, как колебания освещенности фотодиодов (ФД), их чувствительности, изменениям коэффициента усиления, прозрачности оптики и тому подобное.

Есть еще более высокочастотные внутренние шумы усилителя, ФД, сопротивлений, шум угла поворота зеркала (зеркального отражателя – ЗО) за счет броуновского движения и тому подобное. Ранее проведенные нами расчеты показали, что с учетом ООС по сигналу и его производной вклад этих шумов, приведенных к выходу, – не превышает 0,001 нТл.



## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА КВАРЦЕВОГО МАГНИТОМЕТРА

Рассмотрим структурную цепь магнитометра, то есть – магнитоизмерительного преобразователя (МИП) на основе кварцевого магнитного датчика (КМД) [6, 7]. По существу, это цепь преобразователей (см. рис.1, рис.2 и рис.3).



Рис.1. Структурная схема МИП [6-8].

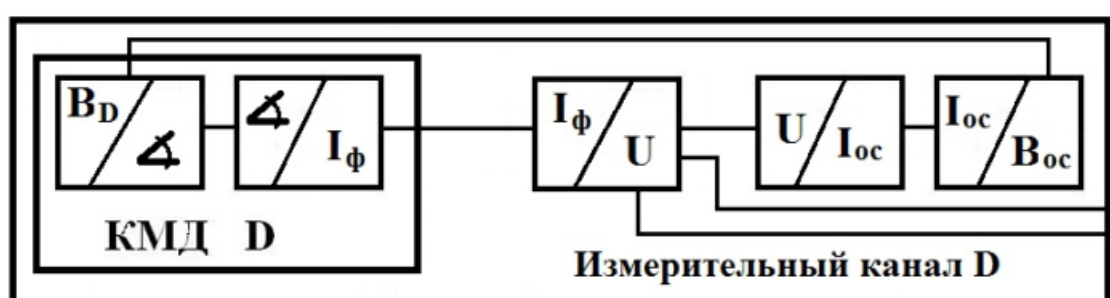


Рис.2. Структурная схема МИП одного канала кварцевого магнитометра [6-7].

Датчик преобразует вариации МП в угол поворота подвижного магнита ( $B/\angle$ ). Оптическая схема датчика преобразует угол поворота подвижного зеркала в линейный сдвиг двух световых пятен. Два ФД (см. рис.3 и рис.4), включенные по дифференциальной схеме, преобразуют линейный сдвиг световых пятен в фототок ( $\angle/I_{\phi}$ ) [1]. Первый каскад усилителя (1к) на рис.5 – линейно преобразует фототок в напряжение ( $I_{\phi}/U$ ). Второй каскад усилителя (2к) усиливает сигнал до необходимой величины, после чего напряжение с выхода второго каскада усилителя и его производная линейно преобразуются в ток ( $U/I_{oc}$ ), который катушкой ОС преобразуется в МП, компенсирующее примерно 0,999 входного сигнала (см. рис.4 и рис.5). Основным требованием ко всем преобразователям является линейность, так как в противном случае цепь замкнутой ОС преобразуется в генератор.



Рисунок 3. Схемы КМД и фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) различных моделей кварцевых магнитометров серии «Кварц-3 и 4» [1, 7, 9].

Рассмотрим более подробно основные элементы структуры магнитометра.

#### Датчик.

Кварцевая рамка (КР) и кварцевая нить (КН) имеет (см. рис.6) температурный коэффициент (ТК) не хуже  $10^{-6}$ , а правильно отожженные компенсирующие магниты, – не хуже  $10^{-5}$ .

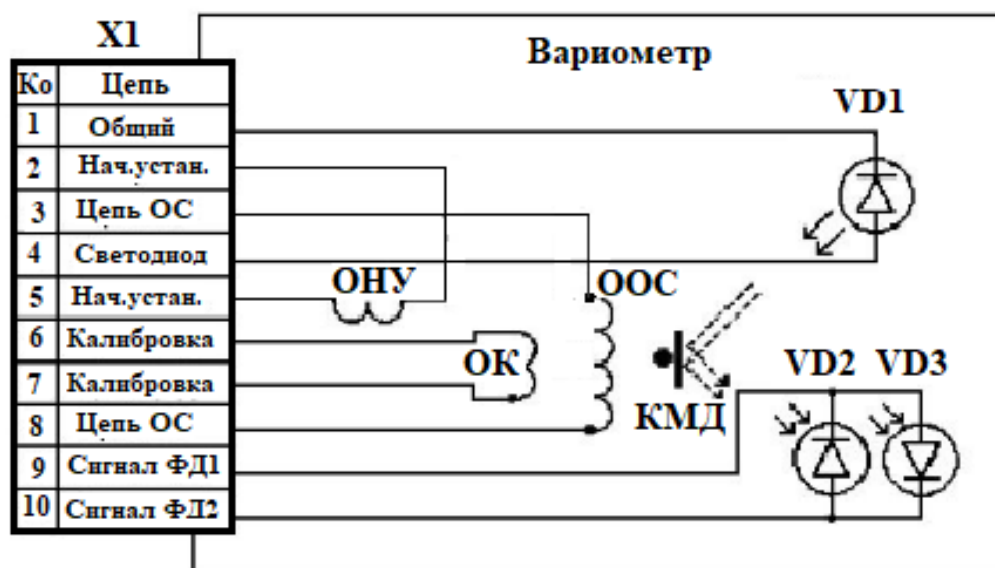


Рисунок 4. Схема принципиальная электрическая КМД «Кварц-3» [1-3, 8].

Это очень существенно, так как это один из опорных элементов, не регулируемый ООС.

На датчик намотана катушка ООС. Коэффициент преобразования тока ОС в МП и его однородность являются еще одним опорным элементом, не регулируемым ООС. Оптическая система КМД создает два идентичных световых пятна на блоке фотопреобразователя (см. рис.3 и рис.4). Два ФД, включенные по дифференциальной схеме, на порядок уменьшают влияние температурных и долговременных дрейфов параметров светодиодов, ФД и оптики. Дальнейшее их влияние на три порядка уменьшается ООС.

#### Усилитель.

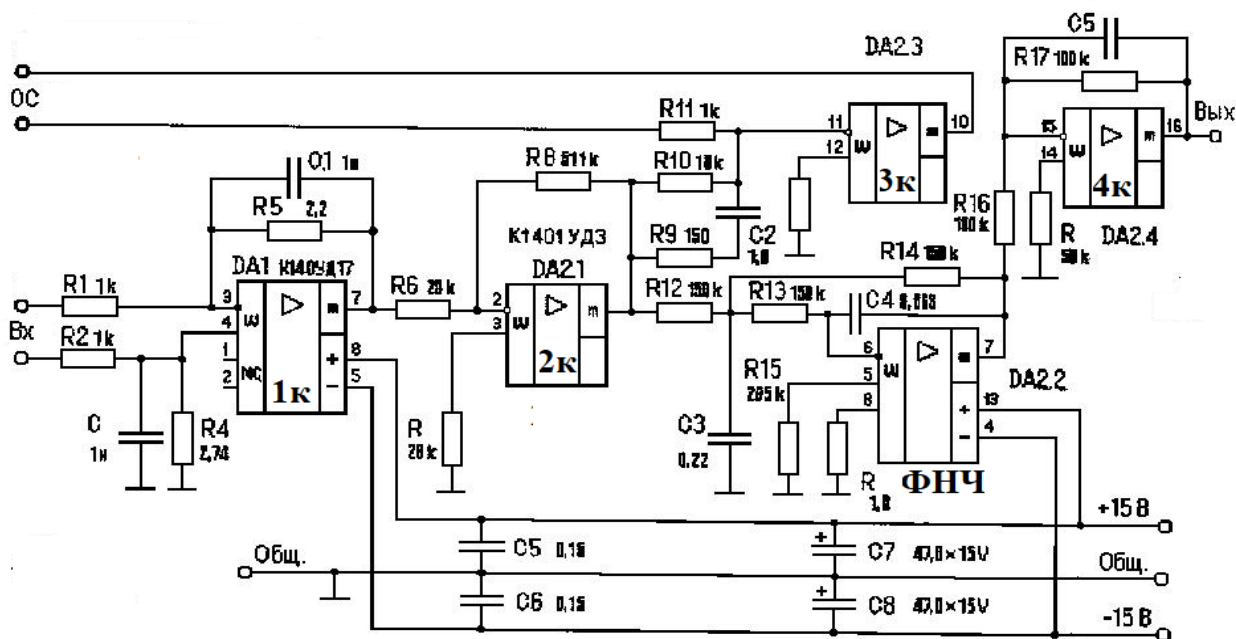


Рисунок 5. Схема принципиальная электрическая усилителя МИП магнитометра «Кварц-3» [8].

Первый каскад усилителя (1к) представляет собой (см. рис.5, рис.6 и рис.7) преобразователь дифференциального фототока в напряжение ( $I_f/U$ ). Основной его задачей является линейность преобразования и только во вторую очередь большой коэффициент преобразования, определяемой величиной сопротивления в цепи ОС каскада. Высокий коэффициент усиления микросхемы ICL7650 (МДМ-усилитель на рис.6) [5, 6, 8, 9] обеспечивает линейность преобразования при использовании большого сопротивления в цепи ОС – 2,7 Мом. Однопроцентная стабильность этого номинала и контроль ООС магнитометра обеспечат точность измерения не хуже  $10^{-4}$  во всем измерительном диапазоне.

Второй каскад усилителя (2к) обеспечивает необходимую глубину ОС и усиление мощности, так как ток ОС, определяемый заданным динамическим диапазоном и количеством витков катушки ООС, может достигать 2-3 мА. Коэффициент усиления этого каскада за счет подбора сопротивления в цепи ОС изменяют до тех пор, пока не будет обеспечена заданная глубина ОС. Здесь может быть использовано программируемое сопротивление, хотя в принципе, такая настройка проводится один раз, а затем сопротивление фиксируется. (Следует отметить, что в одной из конструкций усилителя ЦМВС «Кварц-4» применено программируемое сопротивление – цифровой потенциометр типа AD5242BR). Этот каскад регулируется ООС магнитометра и достаточна однопроцентная стабильность его элементов.

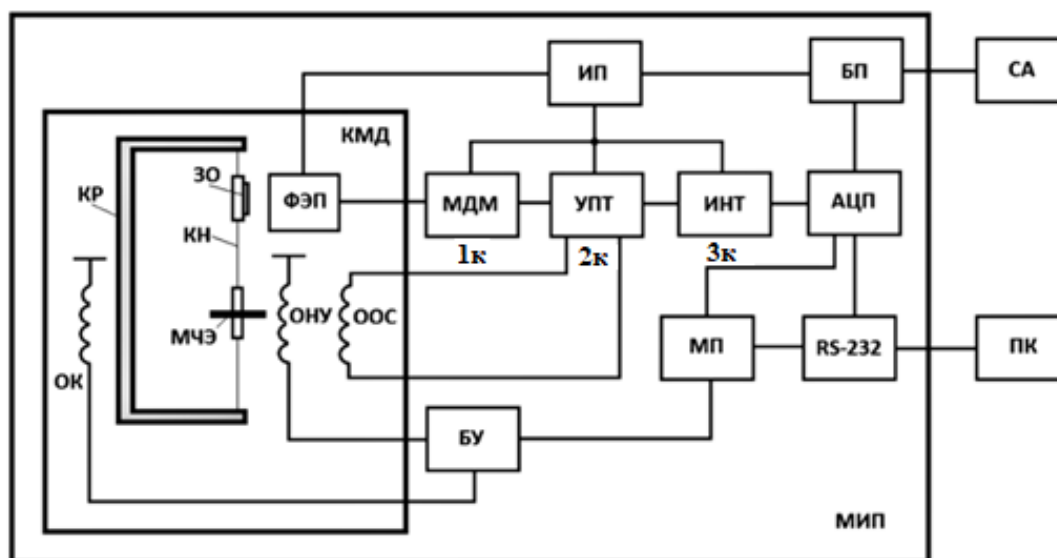


Рисунок 6. Функциональная схема одного канала цифрового кварцевого магнитометра, преобразователь МП – цифра [7-9].

Третий каскад усилителя (3к), в цепь ОС которого включена катушка ООС магнитометра, используется как операционный усилитель для линеаризации преобразования напряжения на выходе второго каскада (2к) и его производной в ток ( $U/I_{ос}$ ), создающий компенсирующее МП и МП демпфирования. Элементами преобразования являются резистор и емкость, связывающие выход второго каскада с инвертирующим входом третьего каскада усилителя. Этот резистор является еще одним опорным элементом в цепи преобразований, от стабильности которого зависит точность измерений. Стабильность этого резистора должна быть не хуже 0,05%. Номинал дифференцирующей емкости подбирается во время настройки магнитометра и обычно он составляет 1 мкФ, но достаточно часто требуется немного больше. Поэтому на плате усилителя предусмотрено посадочное место для установки параллельной емкости (см. рис.7). Номинал этой емкости контролирует только форму АЧХ и ее точность не влияет на точность измерений. Коэффициент усиления микросхем второго и третьего каскадов желательно иметь не менее 50000, что в данном случае и обеспечивает микросхема ОР497 [3].

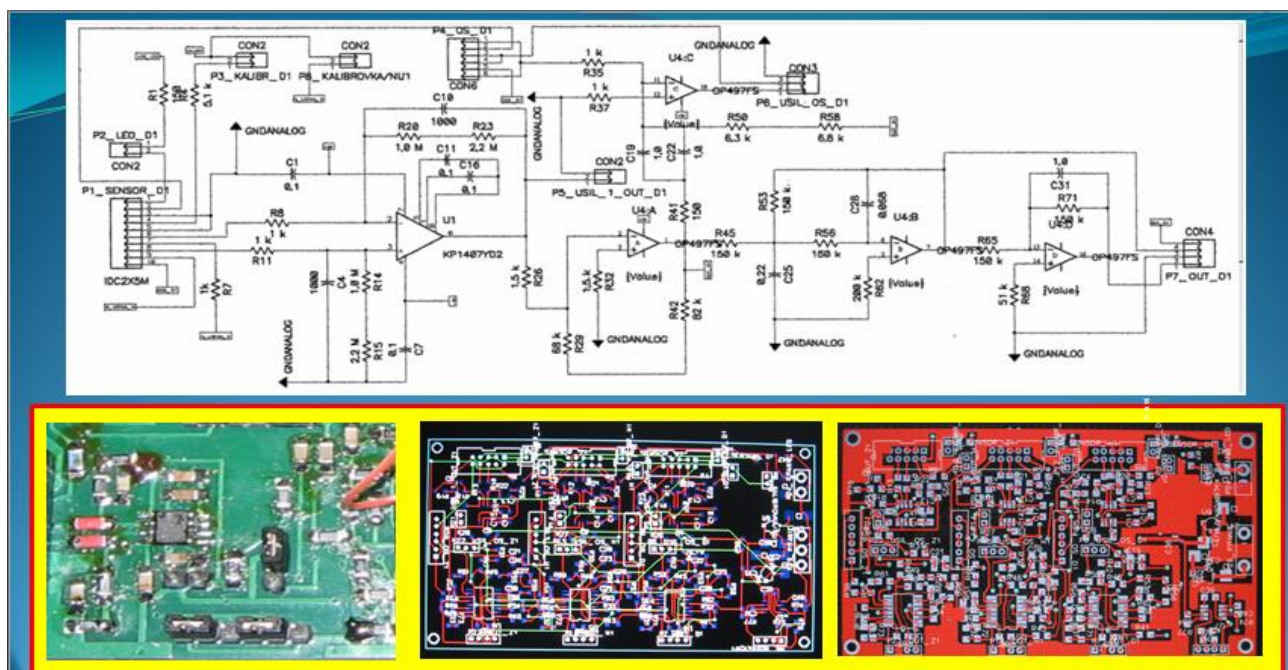


Рисунок 7. Схема принципиальная электрическая одного усилительного канала ЦМВС «Кварц-4» и фото платы усилителей с предусмотренными «посадочными местами» для элементов настройки магнитометра.

Напряжение на выходе второго каскада пропорционально компенсирующему МП, а коэффициент пропорциональности – чувствительность прибора. Следует заметить, что при этом возникает систематическая ошибка измеряемой величины примерно 0,1%. В случае менее глубокой ООС, – ошибка будет больше. Эту ошибку можно учесть, если достаточно точно знать собственную частоту датчика и магнитометра. Если выходной сигнал магнитометра нормируется эталонным внешним полем, то ошибка за счет недокомпенсации автоматически учитывается.

## ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТРЕБОВАНИЙ К МАГНИТОМЕТРУ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрим основные задаваемые параметры и требования к реальной схеме и конструкции современных цифровых магнитометров и ЦМВС на основе КМД, которые необходимы для реализации необходимой (или заданной) точности измерений.

Частотный диапазон: 0...15 Гц. Ранее (при изготовлении более ранних версий кварцевых магнитометров) на практике было ограничение частотного диапазона до 5 Гц, что было обусловлено разрешающей способностью применяемых АЦП, которая была 16 разрядов максимум. При наличии современных 24-разрядных АЦП уже можно говорить о расширении частотного диапазона для магнитометра до 15 Гц, но про соотношение сигнала и шума в этом случае пока ничего не ясно и рано обсуждать, так как необходимо сначала провести измерения (или конкретно для каждой модели МИП исследования) с разрешением по времени (циклом измерения) в 100 Гц.

Динамический диапазон –  $\pm 5000$  нТл. Если:

- разрешающая способность прибора – 0,1 нТл – необходимо 16 разрядов АЦП;
- разрешающая способность прибора – 0,01 нТл – необходимо 19 разрядов АЦП;
- разрешающая способность прибора – 0,001 нТл – необходимо 24 разряда АЦП.

На самом деле гарантируемая точность измерений, и реально используемая на практике, составляет 16 разрядов АЦП. Но, иногда, если позволяет уровень шумов в высокочастотном диапазоне в месте установки прибора, – может использоваться и более высокая точность измерений. Примером использования максимальной разрешающей способности кварцевых магнитометров в реальных условиях является применение приборов

(ЦМВС «Кварц-4») в условиях магнитной обсерватории (МО) «Арти», где уровень естественных шумов составлял не более 2...5 пкТл [3, 8]. В этом случае в качестве АЦП в магнитометре использовалась микросхема четырехканального АЦП AD7734 (24 разряда) с управляющим микропроцессором.

Температурная стабильность КМД должна быть не хуже 0,1 нТл/°С. Для D-вариометра это почти всегда выполняется, а для остальных – необходимо делать температурные компенсаторы для КМД и всего прибора (как это показано в работе [10, 11]) или устанавливать резисторы с нужной температурной зависимостью.

Долговременная стабильность – 1 нТл/год без учета наклона постаменты, иначе необходимо измерять углы и вводить поправки.

#### Датчик.

При настройке КМД [8] необходимо иметь в виду, что его собственная частота не должна превышать 1 Гц, в крайнем случае, – 1,1 Гц. Это касается главным образом D-вариометра, где не желательно устанавливать дополнительные магниты. В случае Y, H, Z-вариометров, желательно их «очувствить» (увеличить их чувствительность). При этом необходимо знать реальные параметры соотношения чувствительности и собственной частоты для данной партии зеркал (ЗО) и магнитов, необходимо знать собственную частоту каждого конкретного КМД в том МП, где предполагается его установка. Для ее измерения и определения в самом простом случае необходимо иметь только низкочастотный звуковой генератор, при этом очень высокая точность измерения здесь не требуется.

#### Катушка ООС магнитометра.

Для повышения стабильности постоянной преобразования тока в МП катушка должна быть выполнена виток к витку и не более чем в два ряда (два слоя). С другой стороны, – большее число витков было бы весьма желательно, так как это уменьшает ток ООС и его производной – тока демпфирования. Однако мотать обмотку проводом тоньше 0,1 мм практически очень трудно, – он рвется. Вероятно, компромисс заключается в катушке проводом в пределах 250...400 витков. В дальнейшем для реальных оценок (исходя из реальных конструктивных размеров корпуса КМД) примем цифру 300 витков. Следует отметить, что в некоторых случаях, при изготовлении КМД на рабочий диапазон в  $\pm 7...10$  мкТл, выполнялись катушки ООС с количеством витков 500 и более.

#### Производные параметры магнитометра.

Оценим номинал резистора, соединяющего выход второго каскада (см. рис.5 и рис.7) с инвертирующим входом третьего каскада и определяющего максимальную величину тока ООС магнитометра. В магнитометре [3] напряжение питания (см. рис.7) выбрано  $\pm 5$  В, динамический диапазон выходного напряжения второго каскада и, соответственно, всего магнитометра  $\pm 4$  В. Если (в процессе изготовления) динамический диапазон магнитометра равен  $\pm 5000$  нТл и постоянная катушки ООС равна примерно 3500 нТл/мВ, то  $R_{ос} = 2,7$  кОм. Конечно, эта цифра приблизительная, но она должна обеспечить заданный диапазон. Как уже отмечалось, стабильность этого резистора определяет стабильность магнитометра, но, с другой стороны, – правильно подобранный ТК может скомпенсировать температурный дрейф остальной части магнитометра.

Правильный подбор параллельной этому резистору дифференцирующей емкости имеет очень важное значение для формирования АЧХ магнитометра. Если частотный диапазон магнитометра 0...15 Гц, а промышленный шум на 50 Гц необходимо убрать (отфильтровать) и при этом обеспечить глубину ОС не менее 1000, АЧХ должна иметь максимум на частоте 35 Гц с амплитудой, примерно вдвое больше амплитуды линейной области. Величина емкости дифференцирования при этом  $S_{дмп} = 2$  мкФ +  $S_{настр}$ , где емкость настройки зависит от индивидуальных особенностей датчика.

Если в первом каскаде усилителя резистор в цепи ОС выбрать 2,2 Мом, а ограничивающий резистор между выходом первого каскада и инвертирующим входом второго каскада усилителя – 5 кОм, то резистор в цепи ОС второго каскада будет порядка нескольких десятков кОм (50...150 кОм). Точнее оценить номинал этого резистора



практически невозможно, так как он зависит от индивидуальных особенностей датчика, светодиода, ФД и результатов сборки схемы фотоэлектрического преобразователя (ФЭП). В процессе выпуска кварцевых магнитометров и ЦМВС [1] было реализовано 5 или 6 модификаций усилителей МИП, и каждый раз коэффициент усиления второго каскада (2к) подбирался индивидуально (см. рис.5) и демпфировал все изменения. Для этого в его схему устанавливался резистор в несколько сот кОм для проверки тракта усилителя и на печатных платах усилителя оставлялось свободное посадочное место для подборки параллельного резистора (например, см. рис.7).

В предыдущих модификациях усилителя магнитометра было использовано еще два выходных каскада: фильтр нижних частот (ФНЧ) второго порядка (см. рис.5) с частотой среза 5 Гц и конвертор для АЦП (4к) с дифференциальным входом. При цифровой обработке сигнала каскад с ФНЧ можно исключить тем более, что его надо пересчитывать для частоты 15 Гц, но программа обработки требуется хорошая, так как при использовании антинаклонного датчика со смещенным центром тяжести из-за микросейсмов будут возникать колебания на собственной частоте 35 Гц.

#### Новая модификация и конструкция усилительного тракта.

В новой модификации усилителя в ЦМВС «Кварц-4» используются современные идеи и устройства, например, автоматическая программная установка коэффициента усиления усилительного тракта и, в перспективе, – автоматическое переключение диапазонов.

Если проектировать и настраивать магнитометр на три диапазона:  $\pm 500$ ,  $\pm 1500$  и  $\pm 5000$  нТл, – то, с одной стороны, это: экваториальная, среднеширотная (до субавроральной), субавроральная и авроральная области. С другой стороны это: спокойные и слабо возмущенные, возмущенные и очень возмущенные условия.

При уменьшении динамического диапазона увеличивается отношение сигнала к шуму в области частот 1...15 Гц.

Такая перестройка может быть как в автоматическом режиме (программно – по сравнению сигнала с устанавливаемыми границами поддиапазонов), так и по команде. Для такой перестройки необходимо изменить номиналы двух резисторов и емкости (см. рис.7). Резистор в цепи ОС второго каскада усилителя, контролирующий коэффициент усиления, – будет изменяться в пределах 50...500 кОм, то есть реально может быть установлен номинал 1 МОм. Резистор в цепи ОС магнитометра, контролирующий преобразование выходного напряжения в ток ООС, – будет изменяться в пределах 2,7...27 кОм, то есть номинал может быть 50 или 100 кОм. При этом необходимо иметь в виду, что к стабильности этого резистора повышенные требования и ТК в 700 ppm неприемлем.

Дифференцирующая емкость на выходе второго каскада усилителя будет изменяться от 2 мкФ и более...до 0,2 мкФ. Необходимо в этом случае только использовать микросхему аналоговых ключей с переходным сопротивлением менее 10 Ом в открытом состоянии. Практически в схеме усилителя ЦМВС «Кварц-4» в настоящее время используются аналоговые ключи (ADG451) с переходным сопротивлением 4...5 Ом.

Может быть в дальнейшем имеет смысл сделать автоматический перезапуск магнитометра по нулю дисперсии выходного сигнала в течение заданного времени.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Эти заметки, размышления, выводы и решения должны быть полезны для специалистов-магнитологов, которые активно в настоящее время заняты улучшением конструкции уже созданных магнитометров на основе КМД или занимающихся созданием новых и более перспективных конструкций приборов

## **Список литературы:**

1. Белов Б. А., Бурцев Ю. А., Кириаков В. Х., Любимов В. В. Цифровые кварцевые магнитные вариационные станции // Датчики и Системы / Новые приборы. М.: «ООО СенСиДат», 2006. №.5 С.37-40. DOI: 10.5281/zenodo.5648481



2. Белов Б.А., Бурцев Ю.А., Кузнецов В.Д., Любимов В.В. Кварцевые приборы ИЗМИРАН в полярных геомагнитных исследованиях// Экономика и производство / Журнал организаторов производства/Журнал депонированных рукописей №.4. апрель 2006 г. DOI: 10.5281/zenodo.3722557
3. Бурцев Ю.А., Кириаков В.Х., Любимов В.В. Цифровая магнитовариационная станция «КВАРЦ-4» для магнитных обсерваторий // Материалы Международного семинара «170 лет обсерваторских наблюдений на Урале: история и современное состояние». Екатеринбург, 17-23 июля 2006 г. Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2006. С.38 – 41. DOI: 10.5281/zenodo.3668293
4. Любимов В.В. Станция трёхкомпонентная магнитовариационная // Приборы. М., 2016. №12. С.1-4. DOI: 10.5281/zenodo.2567474
5. Любимов В.В. Универсальная цифровая магнитовариационная станция на базе кварцевых магнитных датчиков для работы в широком диапазоне полей // Приднепровский научный вестник. Днепропетровск: «Наука и образование», 2016. Т. 9. С.95-105. DOI: 10.5281/zenodo.5593499
6. Любимов В.В. Магнитоизмерительный преобразователь на основе кварцевых датчиков // INTERNATIONAL SCIENCE PROJECT, Turku, Finland, 2018. 1 часть №21. С.13-20. DOI: 10.5281/zenodo.2566013
7. Любимов В.В. Магнитоизмерительный преобразователь для цифровых вариационных станций // Приборы, М., 2019. №8. С.11-16. DOI: 10.5281/zenodo.3463661
8. Любимов В.В. Кварцевые датчики магнитного поля, магнитовариационные станции и приборы на их основе (Библиография) // Евразийское научное объединение. М., 2020 №5 (63). С.130-144. DOI: 10.5281/zenodo.3888083
9. Любимов В.В. Трёхкомпонентный кварцевый магнитометр // Евразийское научное объединение. М., 2020 №12 (70). С.100-104. DOI: 10.5281/zenodo.4430324
10. Любимов В.В. КВАРЦЕВЫЕ ПРИБОРЫ. Вопросы разработки. Часть 3: Способы термостатирования кварцевых датчиков различных конструкций и их реализация // Вектор научной мысли: СПб.: МИПИ им. Ломоносова, 2024. №3 (8). С.159-167. DOI: 10.58351/2949-2041.2024.8.3.019
11. Любимов В.В. Новая конструкция активного термостабилизатора для цифровых вариометров и магнитометров, созданных на основе кварцевых магнитных датчиков // Вектор научной мысли: СПб.: МИПИ им. Ломоносова, 2024. №11 (16). С.93-100. DOI: 10.58351/2949-2041.2024.16.11.015

