

В.А. Слаев

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АППАРАТУРЫ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ

Санкт-Петербург

2004

УДК 389.14:621.3:681.3

ББК 30.10

С 47

Слаев В.А.

С 47 Метрологическое обеспечение аппаратуры магнитной записи: Научное издание. — СПб., НПО «Мир и Семья», 2004. — 174 с.: ил. ISBN 5-94395-060-1

Монография посвящена решению проблемы метрологического обеспечения аналоговой аппаратуры точной магнитной записи, как одного из блоков измерительных информационных систем, измерительно-вычислительных комплексов и автоматических систем управления технологическими процессами.

Определены метрологические характеристики аппаратуры магнитной записи, подлежащие нормированию. Описаны разработанные методы и средства измерения погрешности регистрации сигнала измерительной информации в каналах аппаратуры магнитной записи как с учетом, так и с исключением составляющей погрешности, обусловленной изменением времени запаздывания сигнала в канале.

Охарактеризованы разработанные новые методы и средства измерений для экспериментального определения значений отдельных метрологических характеристик аппаратуры магнитной записи таких, как импульсная весовая функция канала, нелинейность его относительной фазо-частотной характеристики, уровень нелинейных искажений испытательного сигнала типа «белого шума», с учетом особенностей проверяемой аппаратуры.

Оценена предельно достижимая точность совместных измерений электрического напряжения и времени, как разновидности динамических измерений. Выведены условия корректности измерения и получены оценки верхней и нижней границ продолжительности времени измерений.

Для научных работников и специалистов, работающих в области метрологии, метрологического обеспечения и прецизионного приборостроения. Может быть полезна студентам и аспирантам технических вузов.

ББК 30.10

ISBN 5-94395-060-1

© Слаев В.А., 2004

*Посвящается Татьяне Горбуновой с благодарностью
за стимулирование работы над монографией*

ВВЕДЕНИЕ

Поскольку точность и достоверность результатов измерений становятся «экономическими параметрами», влияющими на экономию материально-технических и энергетических ресурсов, а также на качество выпускаемой продукции, то развитие научных, технических и организационно — правовых основ метрологического обеспечения измерительных информационных систем (ИИС) различного назначения является актуальным.

Аппаратура точной магнитной записи аналоговых электрических сигналов (АМЗ) измерительной и управляющей информации во многих случаях является неотъемлемой составной частью измерительных информационных систем, измерительно-вычислительных комплексов и автоматизированных систем управления технологическими процессами, применяемых в различных отраслях хозяйства страны.

При использовании аппаратуры точной магнитной записи в качестве одного из блоков измерительных информационных систем ее метрологические характеристики оказывают влияние на результирующие метрологические свойства всей системы. Решение задач анализа ИИС, т. е. оценки ее погрешностей по известным метрологическим свойствам входящих в нее блоков, а также задач синтеза ИИС, т. е. определения требований к метрологическим характеристикам блоков системы по заданным параметрам ИИС и ее структуре, требует развития системы метрологического обеспечения АМЗ, как блока ИИС.

По своему метрологическому статусу АМЗ является промежуточным линейным измерительным преобразователем, который можно рассматривать, как «черный ящик», характеризующийся своими «входами» и «выходами». Измерительный канал АМЗ предназначен для записи, хранения и воспроизведения электрических информационных сигналов без искажений их формы и имеет некоторые специфические особенности по сравнению с традиционными четырехполосниками (типа измерительных усилителей, делителей и т. п.) и каналами систем передачи информации, не позволяющие в полном объеме использовать для метрологического обеспечения АМЗ существующие средства поверки.

К этим особенностям АМЗ относятся: большой и зачастую неопределенный (зависящий от действий оператора) разрыв во времени между

моментами записи и воспроизведения сигнала; искажения временного масштаба воспроизводимого сигнала за счет колебаний, дрейфа и номинальности скорости магнитного носителя как в режиме записи, так и в режиме воспроизведения; возможность использования транспонирования скорости лентопротяжного механизма, приводящего к трансформации спектра регистрируемого сигнала.

Преодоление трудностей, обусловленных перечисленными особенностями АМЗ, приводит к необходимости разработки и исследования новых специфических методов и средств измерений для экспериментального определения её метрологических характеристик с учетом большого разнообразия существующих типов АМЗ (лабораторные стационарные и переносные; портативные; АМЗ для тяжелых условий эксплуатации и др.) и различных режимов ее использования.

Таким образом, решение проблемы исследования и разработки научно-методических и технических основ метрологического обеспечения средств измерений с магнитной записью–воспроизведением аналоговых электрических сигналов представляется актуальным.

Для решения сформулированной проблемы в монографии выделены два основных направления исследований. Во-первых, это развитие теории систем метрологического обеспечения применительно к средствам совместных измерений двух физических величин: электрического напряжения и времени. Во-вторых, это создание методов и средств поверки аналоговой аппаратуры точной магнитной записи. В рамках этих направлений выделены следующие группы задач.

По развитию теории систем метрологического обеспечения:

- оценка предельно достижимой точности совместных измерений электрического напряжения и времени, как разновидности динамических измерений;
- вывод условия корректности измерений и получение оценок верхней и нижней границ продолжительности времени измерений;
- разработка метода построения функциональных зависимостей для совместно измеряемых величин при неполных исходных данных;
- исследование нового способа нормирования динамических характеристик измерительного канала с использованием Марковских параметров;
- математическая формализация понятия качества систем метрологического обеспечения и разработка алгоритма оценки их качества в условиях неполных и неточных данных о ее элементах, связях и свойствах.

По созданию методов и средств поверки АМЗ:

- разработка и исследование методов и средств измерения погрешности регистрации сигнала в канале аналоговой АМЗ как с учетом, так и с

исключением составляющей погрешности, обусловленной изменениями времени запаздывания сигнала в канале;

– разработка и исследование новых методов и средств измерений для экспериментального определения значений отдельных метрологических характеристик АМЗ таких, как импульсная весовая функция канала, нелинейность его относительной фазо-частотной характеристики, уровень нелинейных искажений испытательного сигнала типа «белого шума», с учетом особенностей поверяемой аппаратуры.

В результате проведенных исследований с использованием математического аппарата теории систем, теории нечетких множеств и функционального анализа получены следующие научные результаты:

– разработан алгоритм оценки качества систем метрологического обеспечения средств измерений в условиях неполных и неточных данных о ее элементах, связях и свойствах, проиллюстрированный на примере проекта поверочной схемы для аналоговой аппаратуры точной магнитной записи;

– предложен способ нормирования динамических характеристик измерительного канала с использованием Марковских параметров, а также метод построения функциональных зависимостей для совместно измеряемых величин, основанный на решении задачи многокритериальной оптимизации;

– найден «пионерский» способ измерения погрешности регистрации аналогового сигнала в измерительном канале АМЗ, а также разработан ряд новых методов измерения значений отдельных метрологических характеристик АМЗ, экспериментальное определение которых затруднено ее особенностями.

Новизна технических решений, разработанных для аппаратурной реализации перечисленных методов, защищена 19 авторскими свидетельствами на изобретение.

На базе полученных научных результатов и предложенных технических решений создано восемь видов средств измерений для экспериментального определения метрологических характеристик аналоговой аппаратуры точной магнитной записи, обеспечивающих ее поверку.

ГЛАВА I. АППАРАТУРА ТОЧНОЙ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, КАК ЗВЕНО ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ, И ЕЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

1.1. Применение магнитной записи–воспроизведения электрических сигналов в измерительной технике и особенности аппаратуры точной магнитной записи, как объекта метрологических исследований

История возникновения и первых применений магнитной записи неразрывно связана с записью речи и радиовещанием [1–10]. Звукозапись предъявляла и предъявляет к аппаратуре магнитной записи, используемой в этих целях, специфические требования, учитывающие физиологические особенности слухового восприятия человека [11–15]. Эти требования нашли свое отражение в задании таких характеристик магнитофонов, как коэффициенты гармонических искажений, детонации, относительный уровень шумов в паузе и т. д. [16, 17]. В то же время характерно отсутствие интереса к измерениям фазовых соотношений спектральных составляющих регистрируемого магнитофоном напряжения, т. е. к форме воспроизводимого сигнала или, другими словами, к погрешности передачи сигнала по каналу аппаратуры магнитной записи.

В процессе развития техника магнитной записи электрических сигналов получила широкое распространение для регистрации самой разнообразной информации [18–73] в аналоговом или цифровом виде. В частности, аппаратура магнитной записи–воспроизведения зачастую является необходимой составной частью измерительных информационных систем [74], измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) и систем автоматического управления (например, автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП)), может служить в качестве переменной линии задержки для корреляционных анализаторов, в качестве устройств ввода сигнала с изменяемым временным масштабом для спектроанализаторов [33], как канал связи, обеспечивающий бесконтактный метод поверки [37], и т. д.

При регистрации сигналов измерительной информации к аппаратуре магнитной записи–воспроизведения, естественно, предъявляются требования по точности регистрации. В этом случае аппаратура магнитной записи рассматривается как один из блоков многоблочной измерительной информационной системы, основная и дополнительная погрешности которого существенно влияют на метрологические характеристики системы в целом. Иначе говоря, к аппаратуре магнитной записи предъявляются требования по точности такие же, как и к любому средству измерений. Отсюда следует, что эта аппаратура должна характеризоваться комплексом нормируемых метрологических характеристик в соответствии с [75], дающих достаточную информацию о ее метрологических свойствах. Аппаратуру магнитной записи, предназначенную для записи и воспроизведения электрических сигналов измерительной информации, с нормированными метрологическими характеристиками в дальнейшем будем называть (в соответствии с [76]) аппаратурой точной магнитной записи (АМЗ).

Основным назначением АМЗ, применяемой в составе ИИС, является запись (регистрация), хранение и воспроизведение (считывание) электрических сигналов измерительной информации без искажений. Часто АМЗ используют для линейного преобразования амплитудного и временного масштаба сигнала, многократного воспроизведения с целью анализа его параметров и т. д.

Обобщенную структурную схему аппаратуры точной магнитной записи можно представить в виде [48], приведенном на рис. 1.1.

На нем выделены такие ее составные части, как электронный блок записи 1, лентопротяжный механизм 2 (ЛПМ) и электронный блок воспроизведения 3. Блок записи 1 включает в себя входные преобразователи 4, модуляционные устройства 5, усилители записи 6 и генератор опорного или контрольного пилот-сигнала 7. Лентопротяжный механизм 2 содержит магнитные головки записи 8 и воспроизведения (считывания) 11 (или универсальные магнитные головки), приемную и подающую кассеты 9 и магнитный носитель 10. Блок воспроизведения состоит из усилителей воспроизведения (считывания) 12, демодуляторов 13, выходных преобразователей 14, детектора временной ошибки 15 и блока регулирования (компенсации временной ошибки) 16.

Следует отметить аналогию между приведенной обобщенной структурной схемой АМЗ и блок-схемой канала связи, состоящей из передатчика 1, среды распространения передаваемых сигналов 2 и приемника 3. В этом случае блоки 7, 15 и 16 играют роль синхронизирующих устройств. Такая аналогия обусловлена тем, что и канал связи, и АМЗ предназначены для передачи электрических сигналов: первый — в простран-

стве, вторая — во времени. Это дает основания к выводу о том, что задачи метрологического обеспечения каналов связи (передачи информации) и аппаратуры точной магнитной записи во многом аналогичны.

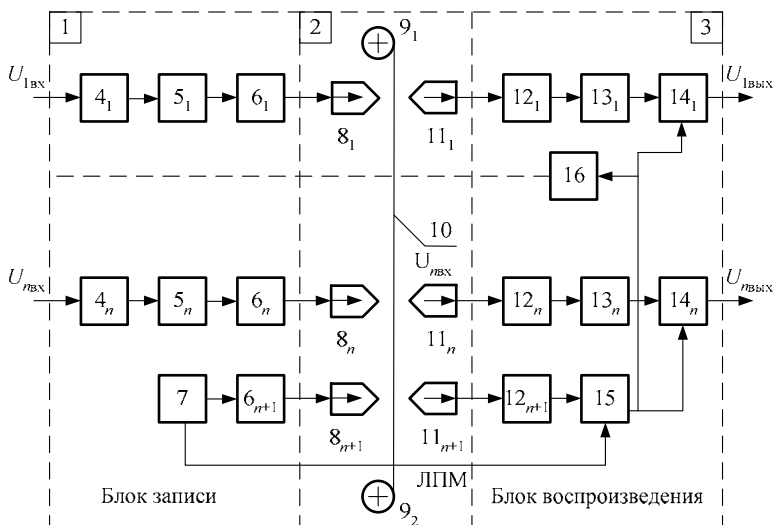


Рис. 1.1. Обобщенная структурная схема аппаратуры точной магнитной записи

- 1 — электронный блок записи; 2 — лентопротяжный механизм;
 3 — электронный блок воспроизведения; 4 — входной преобразователь;
 5 — модулятор; 6 — усилитель записи; 7 — генератор пилот-сигнала;
 8 — магнитная головка записи; 9 — кассета; 10 — магнитный носитель;
 11 — магнитная головка воспроизведения; 12 — усилитель воспроизведения;
 13 — демодулятор; 14 — выходной преобразователь; 15 — детектор временной ошибки; 16 — блок регулирования; $U_{вх}$ — входной регистрируемый сигнал;
 $U_{вых}$ — выходной электрический сигнал

Большой парк разнообразных типов эксплуатируемой и вновь разрабатываемой АМЗ можно классифицировать по различным признакам:

- по виду используемой модуляции сигнала;
- по объему запоминаемой информации, который зависит от числа каналов (или дорожек на магнитном носителе), их полосы пропускания, скорости протяжки и длины носителя (т. е. времени записи сигнала) и амплитудного диапазона регистрируемого электрического напряжения);
- по возможной последовательности применения режимов записи–воспроизведения (например — режим только записи на борту и режим

только воспроизведения при приземлении летательного аппарата, режим одновременной записи и воспроизведения с фиксированной задержкой воспроизводимого сигнала относительно записываемого и т. д.);

– по обеспечению возможности транспонирования скорости движения носителя в режиме воспроизведения, приводящего к трансформации спектра записанного сигнала;

– по типу примененного магнитного носителя (магнитная или металлическая лента, проволока, барабан, диск);

– по назначению, условиям эксплуатации и особенностям конструкции (бортовая или наземная аппаратура, форма тракта лентопротяжного механизма: открытый, закрытый *U*-образный, замкнутое кольцо; катушечные или компакт-кассеты и т. д.);

– по массо-габаритным характеристикам, энергопотреблению, и др.

Пример классификации АМЗ по виду используемой модуляции (способам точной магнитной записи) [48] приведен на рис. 1.2.

Аппаратура точной магнитной записи по виду используемой модуляции может быть отнесена к одному из двух классов — аналоговых или цифровых. Цифровые АМЗ основаны на применении кодово-импульсной модуляции и погрешность регистрации сигналов по ее каналам зависит, в основном, от двух факторов: вероятности сбоя (т. е. пропадания сигнала или появления лишних импульсов) и структуры кодового слова (или кадра).

Аналоговая аппаратура точной магнитной записи получила широкое распространение в связи с ее более высокой информационной емкостью (при одинаковых с цифровой АМЗ объемах) и сравнительной простотой технической реализации. В ней применяются различные виды модуляции: как гармонической несущей (амплитудная — АМ, балансно-амплитудная — БАМ, частотная — ЧМ и фазовая — ФМ), так и модуляция импульсной последовательности (амплитудно-импульсная — АИМ, частотно-импульсная — ЧИМ, фазо-импульсная — ФИМ и время-импульсная — ВИМ, в частности, широтно-импульсная — ШИМ). Наиболее часто используют частотную и широтно-импульсную (одностороннюю, двустороннюю, первого и второго рода) модуляции, так как они обеспечивают более высокое значение такого показателя, как произведение удельного объема запоминаемой информации на точность регистрации.

Объектом исследования выбрана аналоговая аппаратура точной магнитной записи. Это обусловлено тем, что, во-первых, она получила широкое применение в составе ИИС, ИВК и АСУТП и, во-вторых, задача ее проверки, т. е. экспериментального определения погрешности регистрации сигналов по каналам аналоговой АМЗ еще не была решена.

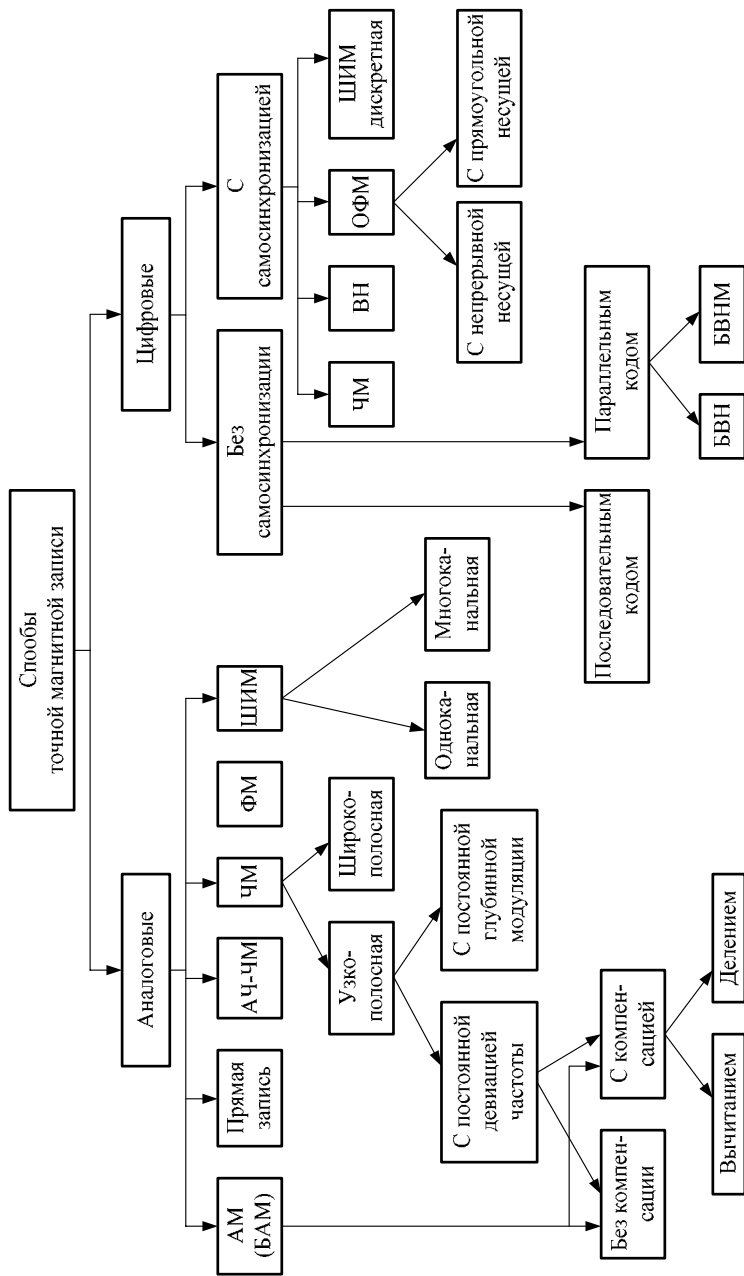


Рис. 1.2. Классификация АМЗ по виду используемой модуляции (способам точной магнитной записи)

Как показано в п. 2.2, по своему метрологическому статусу аналоговая аппаратура точной магнитной записи представляет собой промежуточный линейный электрический измерительный преобразователь. Решение задач определения метрологических характеристик традиционных линейных электрических преобразователей нашло свое отражение в многочисленных публикациях, например, в [77–98]. В то же время аналоговая АМЗ, как объект метрологического исследования, имеет следующие особенности.

Во-первых, в АМЗ моменты времени записи и воспроизведения сигналов разнесены между собой. При одновременно существующих режимах записи и воспроизведения это приводит к некоторой фиксированной задержке между сигналами записи и воспроизведения, равной частному от деления расстояния между головкой записи и головкой воспроизведения на скорость протяжки магнитного носителя (так, при расстоянии между головками 4,76 см и скорости ленты 9,53 см/с интервал задержки сигнала составит 0,5 с). При поочередном включении режима записи и режима воспроизведения интервал задержки между сигналами становится неопределенным и зависит от действий оператора (например, записали сигнал сегодня, а воспроизвели — через год). Поэтому традиционные методы поверки линейных электрических измерительных преобразователей (к примеру, измерительных усилителей, делителей, аттенюаторов, трансформаторов и т. п.) заключающиеся в сравнении переменных испытательных сигналов на выходе и входе преобразователя, для АМЗ непригодны, так как требуют создания образцовой линии задержки сигналов с большим диапазоном регулирования времени запаздывания.

Во-вторых, вследствие нестабильности скорости магнитного носителя как в режиме записи, так и в режиме воспроизведения, временная шкала воспроизводимого сигнала искажается, что приводит к появлению дополнительной погрешности регистрации из-за дрейфа и колебаний времени запаздывания сигнала в канале АМЗ. Это вызывает необходимость компенсировать изменения времени запаздывания при экспериментальном определении основной погрешности регистрации, а также измерять параметры процесса дрейфа и колебаний времени задержки сигнала в канале АМЗ.

В-третьих, многие типы АМЗ позволяют использовать транспонирование скорости магнитного носителя, т. е. осуществлять запись сигнала на одной скорости, а воспроизведение — на другой, что приводит к трансформации спектра сигнала и исключает возможность поверки АМЗ традиционными методами.

В-четвертых, при выборе метода поверки каналов АМЗ: по образцовому средству измерений или по образцовому испытательному сигналу,

предпочтение надо отдать методу поверки по образцовому сигналу, исходя из того, что аналоговая аппаратура точной магнитной записи представляет собой многопараметрическую систему с большим разнообразием ее типов и режимов использования. Кроме того, для получения высоких метрологических характеристик АМЗ ее разрабатывают и изготавливают, образно говоря, на пределе технологических возможностей отечественной промышленности. Поэтому задача создания образцовых АМЗ (да еще многих ее разновидностей) с запасом по точности по сравнению с поверяемой аппаратурой минимум в 2–3 раза представляется не решаемой, да и экономически необоснованной. Следует отметить, что такой подход позволяет рассматривать АМЗ как «черный ящик», т. е. как линейную динамическую систему с известными входами и выходами и неизвестным «содержимым», давая возможность при поверке АМЗ преодолеть трудности, возникающие из-за разнообразия ее типов и сложности устройства внутренних составных частей.

1.2. Основные источники искажений сигналов измерительной информации в каналах магнитной записи–воспроизведения и существующие методы их измерения

Исследованию причин искажений сигнала в канале магнитной записи–воспроизведения посвящено большое число работ отечественных и зарубежных авторов [99–143 и др.].

Основными из них являются:

- частотные искажения, возникающие в системе магнитная головка–лента–головка и в электронных блоках записи–воспроизведения;
- фазовые искажения, возникающие в электронных блоках записи – воспроизведения и в системе головка–магнитная лента–головка;
- нелинейность амплитудных характеристик электронных блоков и процесса записи сигнала в системе головка–лента;
- паразитная амплитудная модуляция;
- шум ленты;
- переходные помехи;
- эффект проникновения;
- копировальный эффект;
- эффект саморазмагничивания;
- дефекты и повреждения магнитного носителя;
- шум электронных блоков записи и воспроизведения;
- колебания, дрейф и ненормальность скорости движения магнитной ленты;
- статический и динамический перекосы магнитной ленты относительно рабочего зазора головки;

– несогласованность входного и выходного импедансов сквозного канала магнитной записи-воспроизведения с выходным импедансом источника сигнала и входным импедансом нагрузки соответственно.

Частотные искажения в аппаратуре магнитной записи образуются за счет неравномерности амплитудно-частотных характеристик электронных блоков записи и воспроизведения, а также из-за частотных и волновых потерь в системе магнитная головка–носитель–головка. Из последних можно выделить волновые потери, порождаемые отдаленностью пластов рабочего слоя ленты от поверхности магнитной головки воспроизведения; волновые потери, происходящие за счет ненулевой ширины зазора и конечных размеров магнитной головки воспроизведения; волновые потери, обусловленные относительным наклоном головок записи и воспроизведения; частотные потери, вносимые магнитным материалом головки; дифференцирующее действие индукционной магнитной головки воспроизведения и др.

Источниками **фазовых искажений**, возникающих при магнитной записи электрических сигналов, являются нелинейность фазо-частотных характеристик электронных блоков записи и воспроизведения, а также искажения в системе магнитная головка–лента–головка. В этой системе фазовые сдвиги складываются из сдвигов при преобразовании тока, протекающего по обмотке, в магнитодвижущую силу в рабочем зазоре магнитной цепи головки записи; при преобразовании магнитодвижущей силы в рабочем зазоре головки записи в напряженность поля записи головки; при преобразовании напряженности поля головки записи в остаточную намагниченность носителя в процессе записи; при преобразовании остаточной намагниченности носителя в магнитодвижущую силу в рабочем зазоре головки воспроизведения; при преобразовании магнитодвижущей силы в рабочем зазоре в магнитный поток в сердечнике головки воспроизведения; при преобразовании магнитного потока в сердечнике воспроизводящей головки в электродвижущую силу, и др.

Нелинейность передаточной характеристики сквозного канала записи–воспроизведения, приводящая к нелинейным искажениям воспроизводимого сигнала, вызывается нелинейностью модуляционной характеристики электронных блоков записи, используемых при частотно-модулированном (или другом модуляционном) способе записи; нелинейностью процесса записи сигнала в системе магнитная головка–лента, имеющей принципиально неустраняемый характер, а также нелинейностью демодуляционной характеристики электронных блоков воспроизведения, обусловленной, в основном, нелинейностью амплитудной характеристики фильтров нижних частот, которые зачастую выполняют роль демодуляторов.

Одной из главных причин **паразитной амплитудной модуляции** воспроизводимого с магнитной ленты сигнала является так называемый «неконтакт», т. е. несовершенный контакт магнитной головки с лентой. Сигналы, записанные на ленту как при прямой записи, так и при записи с насыщением, не удастся воспроизвести с большой амплитудной точностью. Коэффициент паразитной амплитудной модуляции обычно составляет порядка 10 %. При этом сигналы с меньшей длиной волны записи подвержены более быстрым и сильным флуктуациям амплитуды, чем сигналы с большей длиной волны.

Основной причиной появления **собственного шума сигналограммы** является магнитная неоднородность ленты. В практически используемых сигналоносителях рабочий слой не является магнитно-однородным, т. к. состоит из отдельных магнитных кристаллов разной величины и по-разному распределенных в слое. При производстве ленты размеры магнитного слоя не могут быть выдержаны абсолютно точно. В результате полученных колебаний толщины и ширины слоя возникают изменения массы магнитного вещества, проносимого в единицу времени через пишущее поле головки записи. Степень контакта головки с носителем сильно зависит от шероховатости (негладкости) поверхности магнитного слоя. В результате магнитное взаимодействие головки и носителя при движении последнего изменяется во времени, что приводит к колебаниям «эффективно действующей» магнитной массы сигналоносителя в процессах записи и воспроизведения.

Шум при воспроизведении, источником которого является магнитная лента, может быть разделен на шум размагниченной ленты и модуляционный шум. **Модуляционный шум** является дополнительным источником искажений, обнаруживаемым в присутствии сигнала и зависящим от уровня намагниченности ленты.

Переходные помехи обусловлены прониканием сигналов с одного канала аппаратуры магнитной записи на другой в записывающих и воспроизводящих головках, а также в сигналограмме. Необходимые зазоры в сердечниках головок неизбежно создают потоки рассеяния, а полное межголовочное экранирование фактически невозможно из-за нахождения ленты на поверхности головки: ясно, что экраны не могут проходить через ленту.

При быстром изменении намагничивающего поля в поверхностных слоях ферромагнитного тела возникают вихревые токи, защищающие внутренние части сигналоносителя от действия изменяющегося внешнего переменного поля. Это явление получило название **эффекта проникновения**, и сказывается оно в том, что с повышением частоты сигнала на-

магничивание в меньшей степени распространяется по всей толщине сигналоносителя, сосредоточиваясь в его поверхностных слоях.

Копировальный эффект вызывает дополнительные искажения воспроизводимого с ленты сигнала. Наличие внешнего поля у магнитной сигналограммы приводит к тому, что у ленты, смотанной в рулон, поле, образующееся вблизи намагниченных участков, воздействует на соседние, расположенные в этом рулоне, слои магнитной ленты. Напряженность магнитного поля сигналограммы убывает по экспоненциальному закону с увеличением расстояния, поэтому при данной длине волны наиболее интенсивное поле действует только на слои ленты, расположенные в непосредственной близости от слоя, несущего запись сигнала. Примыкающие к этому участку сигналограммы слои ленты, смотанной в рулон, частично намагничиваются полем записанной сигналограммы. В результате на них образуются «магнитные отпечатки» записанного сигнала.

Эффект саморазмагничивания сигналограммы вызывается следующими причинами. При записи продольной сигналограммы длина образующихся магнитов обратно пропорциональна частоте записываемого сигнала. Образующиеся при записи постоянные магниты направлены противоположными полюсами друг к другу, т. е. взаимно размагничивают друг друга. В процессе записи сигналограмма находится в непосредственной близости от сердечника головки с высокой магнитной проницаемостью, поэтому можно предполагать, что в ней практически нет полей саморазмагничивания. При удалении сигналограммы от головки поля саморазмагничивания увеличиваются до максимума. Это приводит к уменьшению отдачи и ограничению частотной характеристики сигналограммы в области высоких частот.

Дефекты магнитной ленты появляются в результате ее износа в процессе эксплуатации, а также из-за случайных повреждений и вследствие неправильного хранения ленты. Износ ленты в процессе эксплуатации заключается в соскабливании рабочего слоя и в осаждении продуктов истирания на поверхности ленты. Получающиеся при этом комочки образуют промежуточный слой между лентой и головками, приводящий к увеличению вероятности выпадений сигнала и к ухудшению частотной характеристики аппаратуры в области малых длин волн. Случайные повреждения ленты, в том числе обрывы и склейки, происходят либо из-за неправильного обращения оператора с лентой, либо вследствие аппаратных неисправностей. При малом натяжении ленты в моменты пуска и останова лентопротяжного механизма витки рулона проскальзывают друг относительно друга, образуя складки. Царапины рабочего слоя ленты, вызываемые острыми выступами неподвижных деталей лентопротяжного

механизма, приводят к «выпучиванию» ленты. Хранение магнитной ленты при повышенной температуре и влажности вызывает слипание витков и механическую деформацию ленты в виде складок и волнистости, а также прогиба и перекашивания рулона.

Причиной **шумов электронных блоков** записи и воспроизведения являются шумы элементов схем, нестабильность порогов срабатывания формирователей, используемых при модуляционной записи, а также фон питания.

Причины возникновения **колебаний скорости носителя** в устройствах записи на магнитную ленту можно разделить на две группы. Первая группа — причины, обусловленные свойствами лентопротяжного механизма; вторая группа — причины, обусловленные механическими свойствами ленты, которая взаимодействует с элементами ЛПМ. В лентопротяжном механизме источниками колебаний являются элементы, движение которых характеризуется низкочастотными нерегулярностями и которые оказывают влияние на перемещение ленты. Кроме того, на сравнительно большом участке свободно натянутая лента находится во фрикционном контакте с деталями механизма, в результате чего она испытывает воздействие возмущающих нерегулярных сил, являющихся причиной высокочастотных колебаний ленты.

Другим источником колебаний скорости является магнитная лента. Она представляет собой эластичный материал, находящийся во фрикционном контакте с элементами ЛПМ при непрерывном растяжении. Неравномерность натяжения и непостоянство моментов вращения, возникающие в ЛПМ, передаются от одного элемента механизма к другому через ленту. Под действием внутренних нерегулярностей работы ЛПМ лента движется «толчками». Толчки возникают и от трения ленты о головки, рабочие поверхности которых не являются идеально гладкими. Применяемая лента из-за своих нелинейных механических свойств еще более усложняет картину явления (имеется в виду преобразование продольных вибраций ленты в поперечные и наоборот). Случайные колебания скорости вызываются тем, что рабочий слой ленты зернист и, когда он трется о неподвижные поверхности, например о головки, на ленту воздействует множество малых силовых импульсов, которые подобны дробовому эффекту в электронных лампах. Реакция ленты на эти импульсы будет довольно сложной вследствие большого количества возможных резонансов в диапазоне от инфразвуковых частот до сотен кГц.

Таким образом, спектр колебаний скорости магнитного носителя при записи и воспроизведении широк и в результате их действия на регистрируемый сигнал накладываются помехи со сложным спектром. Однако

необходимо иметь в виду, что конечная полоса пропускания канала аппаратуры магнитной записи значительно ослабляет действие составляющих колебаний скорости, частота которых превышает верхнюю граничную частоту полосы пропускания канала.

Перекося рабочего зороа магнитной головки приводит к постоянным и переменным временным и фазовым сдвигам между сигналами, записанными одним блоком головок на разных дорожках. Это явление вызывается также перекашиванием ленты, проходящей через блок головок. Изменяющийся перекося, вызванный колебаниями скорости ленты, приводит к изменяющимся временным и фазовым сдвигам, которые имеют существенное значение для некоторых применений многоканальной аппаратуры магнитной записи. Причинами динамического перекося могут быть также постоянные и переменные градиенты натяжения поперек ленты, а также деформация или другие размерные неоднородности, свойственные ленте.

Аппаратуре магнитной записи, как и любому электрическому четырехполюснику, используемому в качестве измерительного преобразователя, присущи искажения амплитудного масштаба регистрируемых сигналов за счет **конечности входных и выходных импедансов** ее каналов. Уменьшение этих искажений достигается согласованием упомянутых импедансов с выходным импедансом источника сигнала и со входным импедансом нагрузки. Входной импеданс канала должен быть много больше выходного импеданса источника сигнала и, в идеале, приближаться к бесконечности. Выходной импеданс канала должен быть много меньше входного импеданса нагрузки и, в идеале, равняться нулю.

Анализ перечисленных искажений сигнала, характерных для канала магнитной записи—воспроизведения, показывает, что их можно укрупненно разделить на четыре группы:

- динамические искажения;
- нелинейные искажения;
- помехи;
- искажения временного масштаба сигнала.

При этом первые три группы можно рассматривать, как частные составляющие основной погрешности, а последнюю — как дополнительную погрешность передачи сигнала по каналу АМЗ.

Динамические искажения, т. е. искажения, появляющиеся при регистрации изменяющихся во времени сигналов, включают в себя частотные и фазовые искажения, а также искажения, обусловленные эффектами саморазмагничивания и проникновения.

В помехи, искажающие выходной сигнал аппаратуры магнитной записи, входят паразитная амплитудная модуляция, собственные шумы

сигналограммы, переходные помехи между каналами, комбинационные составляющие при модуляционных способах записи, копируемый эффект, помехи из-за дефектов магнитной ленты и шумы электронных блоков записи–воспроизведения. Сюда же можно отнести искажения амплитудного масштаба сигнала за счет конечности импедансов канала.

Искажения временного масштаба сигнала вызываются колебаниями скорости магнитного носителя при записи и воспроизведении, ее дрейфом и отличием средней скорости при записи от средней скорости при воспроизведении, а также перекосом рабочего зазора магнитной головки, и характеризуются статистическими параметрами процесса изменений времени запаздывания воспроизводимого сигнала относительно записываемого.

Для многих метрологических параметров АМЗ существуют известные традиционные методы и средства измерений. К таким параметрам относятся [48, 53, 54, 59, 61, 68, 132, 135, 138]: неравномерность АЧХ, динамический диапазон, нелинейность амплитудной характеристики по постоянному току, коэффициент гармоник, дрейф нуля и коэффициента передачи, глубина ПАМ, уровень комбинационных искажений и переходных помех, временной сдвиг сигналов между каналами, отклонение скоростей носителя от номинальных значений и скольжение, коэффициент колебаний скорости ленты и др.

В то же время имеется ряд метрологических характеристик АМЗ, экспериментальное определение которых требует создания новых, нетрадиционных методов и средств измерения, что обусловлено особенностями АМЗ, как объекта метрологических исследований, приведенными в п. 1.1. К ним относятся: нелинейность фазо-частотных характеристик, импульсная весовая функция канала, уровень нелинейных искажений сигнала, представляющего собой ограниченный по полосе белый шум, изменения времени запаздывания сигнала в канале и, наконец, погрешность регистрации сигнала. Поэтому основное внимание в дальнейшем уделено анализу предложенных методов измерения именно этих параметров.

Подробный и обстоятельный обзор методов **измерения нелинейности ФЧХ АМЗ** приведен в [144]. На основе критического анализа более 60 источников, включающих в себя монографии, статьи в отечественных и зарубежных научно-технических журналах, доклады на конференциях, изобретения и патенты, составители аналитического обзора пришли к следующим основным выводам:

– для оценки фазовых соотношений в канале АМЗ могут использоваться только косвенные способы измерения, основанные на применении как двухчастотных, так и многочастотных (групповых) тест-сигналов с

записью по одной дорожке. Однако ни один из рассмотренных способов измерения не обеспечивает полной информации о ФЧХ АМЗ, поскольку для этого требуется знание хотя бы одной точки действительной фазо-частотной характеристики канала;

– отсутствие повторяющихся результатов измерения ФЧХ каналов АМЗ у различных авторов объясняется большим количеством различных факторов, влияющих на получаемые результаты, и отсутствием единой методики выполнения измерений, которая может быть рекомендована для применения при исследовании канала АМЗ.

Последнее делает весьма актуальной задачу разработки метода и средств, а также методики выполнения измерений нелинейности фазо-частотных характеристик каналов АМЗ.

Значительно меньше исследованы возможности определения таких полных динамических характеристик канала АМЗ, как весовая или импульсная весовая функции, представляющие реакцию системы на входной сигнал в виде единичного скачка напряжения или δ -функции Дирака соответственно. Достаточно полный обзор существующих методов определения таких характеристик приведен в [145, 146].

При определении весовой функции канала магнитной записи–воспроизведения [147] в качестве испытательного сигнала используются прямоугольные импульсы большой длительности. Визуализация воспроизводимого переходного процесса осуществляется с помощью электронно-лучевого осциллографа. Точность оценки весовой функции по этому методу определяется погрешностями осциллографических измерений временных и амплитудных соотношений. Для современных электронно-лучевых осциллографов эти погрешности составляют единицы процентов. В этой же работе отмечается, что эксперименты с кратковременными испытательными импульсами, целью которых было получение оценки импульсной весовой функции канала, «не привели к успеху из-за невозможности при условии соблюдения линейности системы получить реакцию на выходе, значительно превышающую уровень шумов».

Попытка измерения значений импульсной весовой функции канала АМЗ с записью на неподвижную ленту узких импульсов и воспроизведением их отклика не обеспечила достаточно высокой точности полученных результатов, что также объясняется малым отношением сигнал / помеха на выходе канала аппаратуры.

Отсюда можно сделать вывод о том, что необходима разработка косвенных методов измерения значений импульсной весовой функции канала АМЗ, учитывающих особенности исследуемой аппаратуры и обеспечивающих необходимую точность.

Особенности измерения **уровня нелинейных искажений** в аппаратуре магнитной записи подробно рассмотрены в [112, 148]. По виду спектра испытательного сигнала методы измерения нелинейных искажений можно классифицировать как одно-, двух- и многочастотные.

При одночастотном испытательном сигнале измеряют коэффициент гармонических искажений, равный отношению корня квадратного из суммы дисперсий высших гармоник к амплитуде первой гармоники, или связанный с ним взаимно однозначно коэффициент нелинейных искажений. Для измерения мощности продуктов нелинейных искажений применяют либо устройства избирательного действия типа спектроанализаторов или селективных вольтметров, либо измерители нелинейных искажений с режекторным фильтром для подавления первой гармоники, либо измерители нелинейных искажений с фильтром верхних частот. Принципиальным недостатком такого метода измерений является то, что выбранная модель испытательного сигнала в виде гармонического напряжения дает заниженную оценку уровня нелинейных искажений для реальных сигналов, имеющих более сложный спектральный состав.

Среди двухчастотных методов определения нелинейных искажений широкое распространение получил метод разностной частоты. При этом в режиме записи на вход исследуемого канала аппаратуры магнитной записи одновременно подаются синусоидальные напряжения двух близких частот, а в режиме воспроизведения измеряются с помощью спектроанализатора или селективного вольтметра амплитуды напряжений комбинационных частот. Затем коэффициент нелинейных искажений рассчитывается по формулам. Анализ методов, использующих двухчастотный испытательный сигнал (способы разностной частоты, взаимной модуляции и др.), показал, что способ разностной частоты может найти лишь ограниченное применение, когда глубина ПАМ не превышает 20 %, а способ взаимной модуляции непригоден для измерения нелинейных искажений в аппаратуре магнитной записи.

Применение многочастотных методов для исследования нелинейных искажений таких, как метод полос шума [102], динамический, корреляционный, с использованием периодических импульсов различной формы и т. п., привлекает тем, что испытательный сигнал выбирается близким по спектру к реальным регистрируемым сигналам. Однако при этом необходимо преодолевать трудности, связанные с временным разрывом между процессами записи и воспроизведения, а также со сложностью аппаратурной реализации. Тем не менее представляется перспективной разработка метода измерения уровня нелинейных искажений с испытательным сигналом типа белого шума, который мог бы обеспечить приемлемую точность результатов измерений.

Задачам измерения **параметров процесса колебаний скорости магнитного носителя** при записи и воспроизведении посвящено большое количество работ [121, 130, 132, 135, 137–141]. Однако составляющая погрешности регистрации сигнала, обусловленная колебаниями, дрейфом и неноминальностью скорости магнитного носителя, зависит от изменений времени запаздывания сигнала в канале АМЗ, которое связано с колебаниями скорости носителя интегральным преобразованием, не обеспечивающим однозначности его оценки даже при известных параметрах процесса колебаний скорости ленты.

Поэтому актуальной задачей является разработка методов и средств измерения изменений времени запаздывания сигнала в канале АМЗ.

Что касается определения погрешности регистрации сигнала аппаратурой точной магнитной записи, то, несмотря на многочисленные попытки ее теоретической и экспериментальной оценки [11, 12, 14, 16, 17, 39, 41, 43, 45, 48, 49, 53, 54, 59, 61, 62, 66–68, 100, 101, 104–109, 115, 117, 119–124, 131, 134, 136] до 1973 года практических результатов в этом направлении получено не было. В то же время отсутствие методов и средств поверки АМЗ не позволяет решить проблему ее метрологического обеспечения. Поэтому создание таких методов и средств измерений является одной из центральных задач разработки научно-технических основ метрологического обеспечения средств измерений с магнитной записью–воспроизведением электрических сигналов.

Характеризуя взаимосвязь исследований метрологических характеристик АМЗ, проведенных в данной монографии, с существующими отечественными и зарубежными научными школами, необходимо, в первую очередь, упомянуть московскую школу, возглавляемую М.В. Гитлицем, А.И. Вичесом и А. И. Гороном и включающую в себя таких исследователей, как В. А. Смирнов, В. Б. Минухин, В.Г. Корольков, Н.Н. Слепов, В.Н. Филинов, Ю.Л. Богородский, Р.М. Беляев, В.А. Аксенов, В. И. Рудман, Р. Я. Сыропятова, А. А. Фридман и др. Кроме того, весомые результаты получены ленинградской школой во главе с В.А. Бурговым и Ю.М. Ишуткиным (М.А. Развин, К.М. Матус, А.С. Закс и др.), киевской школой во главе с М. В. Лауфером и В. К. Железняком (В.А. Геранин, Н.А. Корж, А.Г. Мачульский и др.), а также литовской школой во главе с К.М. Рагульскисом и Р.П. Ясинавичюсом и кишиневской школой (Л.С. Гордеев). Среди зарубежных исследователей необходимо выделить американскую школу исследователей, включающую в себя Г. Дэвиса, С. Чао, Ч. Ми, Ч. Пира и др.

1.3. Задачи метрологического обеспечения средств намерений с магнитной записью–воспроизведением электрических сигналов

В соответствии с [149] под метрологическим обеспечением понимается: «установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений».

При этом под научной основой метрологического обеспечения подразумевается метрология, как «наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности».

Техническими основами метрологического обеспечения являются:

- система государственных эталонов единиц физических величин;
- система передачи размеров единиц физических величин от эталонов всем средствам измерений с помощью образцовых средств измерений и других средств поверки;

- система государственных испытаний средств измерений, предназначенных для серийного или массового производства и ввоза их из-за границы партиями, обеспечивающая единообразие средств измерений при разработке и выпуске их в обращение;

- система государственной и ведомственной поверки или метрологической аттестации средств измерений; обеспечивающая единообразие средств измерений при их изготовлении, эксплуатации и ремонте и др.

Одной из основных целей метрологического обеспечения является повышение качества продукции.

Исходя из этих основных положений, регламентированных в государственном стандарте [149], сформулируем задачи, которые необходимо решить при создании научных и технических основ метрологического обеспечения средств измерений с магнитной записью–воспроизведением аналоговых электрических сигналов.

Часть этих задач, включающая в себя:

- исследование и анализ частных составляющих погрешностей регистрации сигнала по каналу АМЗ, обусловленных различными специфическими факторами, присущими процессу записи–воспроизведения сигнала на магнитный носитель;

- исследование возможности их учета обоснованным комплексом нормированных метрологических характеристик;

- разработка методики теоретического расчета результирующей погрешности регистрации по известным частным ее составляющим, и др., была решена в [145].

Среди научных задач, требующих своего решения для создания научно-методических основ метрологического обеспечения АМЗ, необходимо отметить следующие.

Поскольку передача или регистрация аналогового электрического напряжения является промежуточным преобразованием при проведении совместных измерений двух физических величин: напряжения электрического тока и времени, то целесообразно провести анализ особенностей совместных измерений; оценить предельно достижимую точность совместных измерений электрического напряжения и времени, как разновидности динамических измерений, а также верхнюю и нижнюю границы продолжительности времени измерений; разработать метод построения функциональных зависимостей для совместно измеряемых величин при неполных исходных данных.

Эти исследования были направлены на реализацию п. 1.4.2 «Программы фундаментальных исследований по метрологии до 2005 года [150], связанного с построением системы метрологического обеспечения аппаратуры точной магнитной записи на основе развития теории совместных измерений.

Задача создания научных основ метрологического обеспечения средств измерений включает в себя, как одну из важных компонент, разработку проекта поверочной схемы. При этом возникают вопросы технико-экономического ее обоснования, степени централизации или децентрализации, «привязки» к существующим эталонам единиц физических величин и государственным поверочным схемам, необходимого количества ступеней этой схемы, соотношения точностей образцовых средств измерений по ступеням поверочной схемы, оценки качества создаваемой системы метрологического обеспечения и др.

Следует отметить, что проблема метрологического обеспечения аппаратуры точной магнитной записи возникла и перешла в практическую плоскость только в конце 60-х годов XX века. Как всякое новое дело, решение этой проблемы потребовало уточнения метрологического статуса АМЗ, анализа уравнения связи между ее входными и выходными сигналами, выявления комплекса метрологических характеристик, подлежащих нормированию, обоснования метрологической модели образования результирующей погрешности регистрации сигнала, уточнения способов нормирования отдельных метрологических характеристик АМЗ и т. д.

Актуальность решения проблемы метрологического обеспечения аппаратуры точной магнитной записи, являющейся составной частью современных вычислительных, связанных, измерительных информационных

и других систем передачи информации, объясняется широким ее распространением. Производство АМЗ является одной из ведущих отраслей радиоэлектронной промышленности. Выпуск АМЗ в промышленно развитых странах составляет 5–8 % объема промышленной и 15–20 % — бытовой радиоэлектроники [71]. Десятки фирм многих стран мира выпускают сотни моделей АМЗ четырех основных групп [68]: лабораторные стационарные (например, SE-5000, Англия; ME 260I, Франция), лабораторные переносные (типичные представители — SE 3000 и SE 7000 M, Англия; MT 5528, Франция; H067 и H068 производства ПО «Виброприбор», г. Кишинев), портативные (к примеру, MP 5425, Франция; MR-10 и MR-30, Япония), АМЗ для тяжелых условий эксплуатации ME 4115, «Шлюмберже», Франция; 5600 C, Ханивелл, США, и др.). Отечественная промышленность выпускает ряд моделей АМЗ общепромышленного назначения [54] (типа H036, H046, H048, H056, H057, H062, H067, H068), а также большое количество разновидностей специальной аппаратуры точной магнитной записи (например, «Астра-2В», «Астра-144Н» и др.). При этом по оценке американской фирмы «Ампеко» стоимость выпускаемых в мире устройств точной магнитной записи составляла в 1969 году более 70 % общей стоимости выпускаемой аппаратуры магнитной записи [48]. Это изобилие типов АМЗ, а также зачастую встречающаяся несопоставимость данных о ее параметрах, измеренных различными методами и типами измерительной аппаратуры, поставило в ряд актуальных задач математической формализации понятия качества системы метрологического обеспечения АМЗ и оценки качества такой системы в условиях неполных и неточных данных о ее элементах, связях и свойствах.

Переходя к задаче создания технических основ метрологического обеспечения средств измерений с магнитной записью—воспроизведением электрических сигналов, необходимо выделить ее основу, а именно — разработку и исследование методов и аппаратуры для экспериментального определения основной погрешности регистрации сигнала в измерительном канале аналоговой АМЗ, а также дополнительной погрешности, обусловленной изменениями времени запаздывания сигнала в канале. Кроме того, представляет научный и практический интерес создание методов и средств измерений отдельных, ранее не поддававшихся точному экспериментальному оцениванию, метрологических характеристик АМЗ таких, как импульсная весовая функция, нелинейность относительной фазо-частотной характеристики канала, уровень нелинейных искажений испытательного сигнала типа «белого шума» и др. (п. 1.2).

Эти исследования были направлены на реализацию п. 03.04.01 «Комплексной программы метрологического обеспечения измерительных ин-

формационных систем и автоматизированных систем управления технологическими процессами в отраслях народного хозяйства на 1986–1990 гг.» [151], связанного с созданием образцовых средств поверки и аттестации их измерительных каналов.

Следует добавить, что круг задач создания технических средств метрологического обеспечения АМЗ вообще — то шире, чем тот перечень задач, который сформулирован выше. Например, на практике иногда требуется знание метрологических характеристик не только сквозного (от входа до выхода) канала аппаратуры магнитной записи–воспроизведения, но и метрологических характеристик отдельно блока записи (бортового) и блока воспроизведения (наземного), а также отдельных частных составляющих погрешности регистрации сигнала (при разработке и настройке АМЗ). Однако центральной задачей здесь является создание методов и средств измерения результирующей погрешности передачи сигнала по сквозному каналу АМЗ, которая ранее не находила своего решения. При этом определение метрологических характеристик отдельно для блока записи и для блока воспроизведения может быть осуществлено с помощью сравнительных (относительных) измерений. К примеру, один из лучших по своим параметрам блок записи принимается за образцовый и по нему (вместе с ним) проводится настройка всех блоков воспроизведения и определение метрологических характеристик сквозного канала, а также, наоборот, когда за образцовый принимается выбранный блок воспроизведения. По-существу, при решении вопроса экспериментального определения погрешности передачи сигнала по сквозному каналу АМЗ задача метрологического обеспечения отдельных ее блоков сводится к обеспечению их взаимозаменяемости.

Характеризуя взаимосвязь исследований в этом направлении с отечественными и зарубежными научными школами, необходимо, в первую очередь, выделить школу советских метрологов, таких как: М.Ф. Маликов, В.О. Арутюнов, Ю.В. Тарбеев, С.В. Горбачевич, Е.Ф. Долинский, К.П. Широков, М.Ф. Юдин, А.Н. Гордов, П.В. Новицкий, Е.Д. Колтик, П.Н. Агалецкий, И.Н. Кротков, О.А. Мяздриков, Б.Н. Олейник, П.П. Кремлевский, П.П. Орнатский, Л.И. Волгин, В.Я. Розенберг, И.Б. Челпанов, Ф.Е. Темников, Н.В. Студенцов, М.П. Цапенко, А.Е. Синельников, С.А. Кравченко, Р.Р. Харченко, Э.И. Цветков, В.А. Иванов, В.В. Скотников, В.А. Балалаев, В.И. Фоменко, К.А. Краснов, И.Ф. Шишкин, Ю.И. Александров, А.П. Щелкин, А.Н. Головин, В.А. Грановский, Л.А. Семенов, Т.Н. Сирая. В.С. Александров и др. Среди зарубежных ученых следует отметить работы Л.А. Заде, Л. Финкельштейна (США), Д. Хофманна, Е. Вашны (Германия), Я. Пиотровского (Польша) и др.

ГЛАВА II. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТУРЫ ТОЧНОЙ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ

2.1. Вопросы создания систем метрологического обеспечения

Широкое применение системного подхода в различных областях деятельности естественно приводит к целесообразности введения термина «метрологическая система» (МС), понимая под ним специфический по структуре и содержанию класс организационно-технических систем, представляемых в виде иерархии подсистем, имеющих свои генеральные цели, направления и задачи развития и связанных с проведением точных измерительных процедур и их метрологическим обеспечением [150].

Основными свойствами метрологических систем, в общем случае, являются: большие размеры, сложность, неполнота или нечеткость информации о ее элементах и связях между ними, надежности функционирования, устойчивости, эффективности и т. д. [151].

Большие размеры МС определяются числом элементов и их связей, достигающих десятков и сотен тысяч, масштабом распространения — от отрасли и региона до страны и группы стран, и степенью влияния на внешние системы: приборостроение, научные исследования, высокие и критические технологии, промышленное производство и др.

Сложность МС проявляется в сложности структуры (многоуровневый характер систем, разнородность компонент и связей между ними), в сложности их поведения и неаддитивности свойств, в сложности формализованного описания и управления системами.

Неполнота информации о МС проявляется в нечетком представлении об «идеальной» системе, условиях ее функционирования, в невозможности однозначно предсказать степень влияния тенденций развития внешней среды на МС, многокритериальном характере описания систем и неоднозначности оценок их оптимальности.

Целью развития метрологии, рассматриваемой в качестве метрологической системы, является повышение точности и достоверности результатов измерений, расширение номенклатуры решаемых измерительных задач. Основная проблема дальнейшего развития метрологии состоит в

необходимости разрешения противоречия между растущей потребностью общества в продукте данной науки, т. е. в накопленной достоверной измерительной информации, и ограничением возможностей затрат общества на ее развитие.

К настоящему времени в метрологии достаточно полно сформировались две подсистемы: система фундаментальных метрологических исследований [150] и система метрологического обеспечения хозяйства страны.

Основной задачей системы метрологического обеспечения (СМО) является наиболее полное удовлетворение перспективных потребностей хозяйства страны в метрологическом обеспечении измерений, нацеленном на ускорение научно-технического прогресса путем обеспечения его отраслей достоверной количественной информацией о всей необходимой совокупности используемых величин и параметров.

В соответствии с [149] метрологическое обеспечение — это «установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений», т. е. включает в себя как взаимосвязанные и открытые подсистемы научную (метрологию) и техническую (включающую в себя систему эталонов, систему передачи размеров единиц физических величин от эталонов всем средствам измерений и др.) основы.

Метрология как «наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности» [152] в настоящее время ограничивает свой предмет изучения, по-существу, проблемами точных и достоверных измерений физических величин специальными техническими средствами. В то же время не прекращаются попытки [153–157 и др.] расширить этот предмет путем включения в него так называемых «естественных» измерений, т. е. измерений, проводимых без использования специальных технических средств, а также распространение понятия измерений и не только на физические величины. Доказательство оправданности такого «расширения» — дело будущего, однако игнорировать такую возможность или тенденцию дальнейшего развития метрологии вряд ли целесообразно.

Если такая возможность реализуется, это с необходимостью приведет к пересмотру понятийного аппарата метрологии, к чему загодя надо готовиться. В качестве такого шага в [158] рассмотрены принципы определения основных понятий и требования к системе понятий. В качестве принципов определения основных понятий выделены: общность, однозначность, внутренняя логическая непротиворечивость, соответствие другим понятиям (т. е. возможность как своего выведения из более общих понятий, так и выведения из него менее общих понятий), простота,

удобство, историческая преемственность и возможность верификации, т. е. проверки истинности определяемого понятия. При рассмотрении системы основных понятий необходимо руководствоваться такими принципами, как полнота (замкнутость), непротиворечивость (согласованность), взаимная независимость и удобство (целесообразность).

Выделим в качестве основных понятия «измерение», «измеряемая величина» и «точность измерения». Сокращение их числа вряд ли целесообразно, так как ведет к неоправданному усложнению определения остальных понятий.

Понятие «измерение», будучи основным для метрологии, является методологически важным для философии (в рамках теории познания), естественных и технических наук, а также используется в ряде областей общественных наук. В настоящее время существует несколько десятков вариантов определения этого понятия [159–197 и др.], использующих, в частности, концепцию изоморфизма исследуемых свойств объекта и множеств чисел.

Например, в философии «измерение» определяется в плане взаимодействия физического и психического. Б. Рассел дал такое определение [198]: «Измерением величин, понимаемом в самом широком смысле, является взаимнооднозначное соответствие между всеми или некоторыми величинами определенного типа, с одной стороны, и всеми числами: целыми рациональными или действительными в соответствующих случаях — с другой...».

Наиболее удачным определением понятия «измерение» остается определение, сформулированное проф. Маликовым М.Ф. [159]: «Измерением мы называем познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения».

Для того чтобы дать достаточно общее и содержательное определение понятия «измерение», используем цепочку «порождающих» понятий: «отражение», как восприятие окружающей действительности → «эксперимент», как познавательная деятельность, осуществляемая с определенной целью (в т. ч. качественный, количественный, мысленный или виртуальный) → «измерение».

Таким образом, определение понятия «измерение» должно отражать следующие аспекты: познавательная деятельность, деятельность целевого характера, предусматривающая взаимодействие объекта и субъекта познания; получение сведений количественного характера в результате проведения процедуры измерения путем сравнения с мерой.

С учетом этих аспектов можно предложить следующее определение этого понятия:

«Измерение — вид познавательной деятельности, предусматривающий взаимодействие субъекта и объекта с целью получения информации о нем, выраженной в числовой форме».

Для понятия «измеряемая величина» цепочка «порождающих» понятий имеет вид: «объекты (процессы)» реального мира → «свойства (характеристики)» объектов (процессов) → «измеряемые величины (параметры)».

Отсюда следует, что «измеряемая величина — это свойство (характеристика) объекта (процесса), допускающее представление в числовой форме». Такое представление иногда называют «числовой моделью».

Для понятия «точность измерения» цепочкой «порождающих» понятий служит: «качество» → «достоверность» → «точность». Поэтому «точность измерения — это степень совпадения числового представления свойства с истинным свойством объекта».

На основе приведенных определений основных понятий могут быть определены другие метрологические понятия в качестве производных, например, «воспроизведение» размера единицы физической величины, его «передача» — как разновидности измерения, и т. д.

Определения основных метрологических понятий базируются на ряде постулатов. Попытки их формулировки делались неоднократно [154, 173, 181, 199 и др.], однако до сих пор отсутствует общепризнанная система постулатов. Требования к системе постулатов аналогичны требованиям к системе понятий. В концептуальный базис метрологии, как науки об измерениях, наряду с основными понятиями должны, по-видимому, входить следующие постулаты:

а) объекты (процессы) реального мира измеримы (т. е. любые их свойства могут быть измерены).

Отметим при этом, что получаемая измерительная информация используется для построения моделей объекта (процесса);

б) измерение устанавливает соответствие между свойством объекта и его (числовой) моделью.

Приведенные постулаты и понятия дают такие преимущества, как соответствие возможным перспективам развития современной метрологии, применимость во всех измерительных шкалах и устранение разрыва в определении одних и тех же понятий в различных областях научного знания.

Конкретизируя структуру процесса измерений [200], можно представить следующую последовательность необходимых действий: воздействие (взаимодействие), различение, сравнение (сопоставление), регистрация (образование «устойчивой связи», т. е. получение отображения свойства объекта или, другими словами, его образа). Следуя материалистиче-

ской диалектике, этот процесс протекает между двумя объективными реальностями, вступающими друг с другом во взаимодействие, так как только в результате эффективного взаимодействия они могут приобрести друг о друге «знание», как итог процесса измерения. Из опыта известно, что не каждое взаимодействие может привести к знанию о существовании объекта. Например, человеческое существо (в отличие от летучей мыши) не ощущает ультразвуковые колебания, т. е. не получает о них знания, хотя они реально существуют. Поэтому правомерно введение в структуру процесса измерения операции «различение» (распознавание).

Для выполнения измерения нужно сформулировать конкретную измерительную задачу, указав ее компоненты: измеряемая физическая величина (свойство), объект изучения (ее носитель), условия измерений (внешние влияющие величины), заданная (требуемая) погрешность, форма представления результата измерения, пространственно — временные координаты (отвечающие на вопросы: «когда, где, за какое время» провести измерения) и др.

На втором этапе разрабатывается план измерительного эксперимента, дающий ответ на вопрос «как делать». Компоненты этого плана уже могут быть выбраны, в отличие от компонентов измерительной задачи. К ним можно отнести: выбранную единицу измеряемой физической величины, метод измерения, тип средства измерения, оператора, реализующего план измерительного эксперимента, средства обработки результатов измерений, вспомогательные средства и т. д. Разработка плана измерительного эксперимента осуществляется на основе априорной информации, т. е. метрологической информации, накопленной до начала решения измерительной задачи.

На третьем этапе идет процесс реальных преобразований, связанных с физическим взаимодействием выбранных средств измерений с объектом, внешними условиями и оператором (наблюдателем), осуществляющим операции различения, сравнения и регистрации результата.

На четвертом этапе производится обработка полученной измерительной информации на основе имеющейся априорной информации с использованием или без использования средств вычислительной техники и других вспомогательных устройств [201, 202].

Этими этапами, по-существу, процесс измерений представлен в виде некоторого алгоритма нахождения значения измеряемой величины. В силу принципиальной ограниченности (конечности) наших знаний любому процессу измерений имманентно присуще отличие реального алгоритма операций нахождения значения измеряемой величины от идеального (требуемого). Это находит свое выражение в наличии неизбежной

погрешности результата измерений — важнейшем свойстве любого измерения [201, 202].

Источниками погрешности измерения являются все перечисленные выше компоненты измерительной задачи и плана измерительного эксперимента, т. е. объект измерения, являющийся источником измеряемой величины; средство измерений с присущими ему внутренними свойствами; условия измерений с влияющими величинами; субъект, производящий измерения (оператор-наблюдатель) и т. д.

Кроме того, необходимо учитывать также принципиальные для любого измерения ограничения такие, как:

- наличие конечного (ненулевого) интервала времени $\Delta t = \tau_{изм}$, необходимого для реализации алгоритма измерения;
- необходимость априорного установления требований к границам погрешности измерений (тогда и только тогда измерение приобретает реальное практическое значение).

Совместный учет упомянутых принципиальных свойств любого измерения позволяет сформулировать общее условие корректности измерений. Для простейшего случая прямых однократных измерений (наиболее важных практически, поскольку к ним сводятся все остальные случаи) это условие можно записать в следующем виде:

$$\delta_0 + \delta_\varphi(\tau_{изм}) + \delta_s(\tau_{изм}) + \delta_\psi(\tau_{изм}) + \delta_v(\tau_{изм}) = \delta_n. \quad (2.1)$$

Здесь: δ_0 — относительная погрешность измерения «мгновенного» значения данной величины φ ; $\delta_\varphi(\tau_{изм})$ — относительная погрешность, обусловленная изменением измеряемой величины φ за время измерений $\tau_{изм}$; $\delta_s(\tau_{изм})$ — относительная погрешность, обусловленная изменением за время $\tau_{изм}$ метрологических характеристик средства измерений в нормальных условиях; $\delta_\psi(\tau_{изм})$ — относительная результирующая погрешность, обусловленная изменениями за время $\tau_{изм}$ всех влияющих величин ψ (параметров окружающей среды) за пределами нормальных условий; $\delta_v(\tau_{изм})$ — относительная погрешность, обусловленная изменениями параметров органов восприятия оператора-наблюдателя за время $\tau_{изм}$; δ_n — нормированное (заданное, требуемое, допускаемое) значение относительной погрешности измерений.

Все погрешности в (2.1) взяты по модулю и приведены к входной измеряемой величине.

Следует отметить, что поскольку «мгновенные» измерения (измерения за бесконечно малые интервалы времени) на практике не могут быть реализованы и являются лишь математической идеализацией (абстракцией), то составляющую погрешность δ_0 в (2.1) нужно рассматривать как

«статическую» составляющую погрешности измерений, тогда как остальные четыре члена левой части неравенства (2.1) — как «динамические» составляющие погрешности измерений.

Из общего условия корректности измерений (2.1) можно вывести границы необходимого интервала времени измерения $\tau_{изм}$.

Пусть t_0 (рис. 2.1) — момент «включения» источника измеряемой величины φ . Очевидно, что интервал времени измерения не может быть больше того предельного значения, при котором изменение самой измеряемой величины ($\Delta\varphi_n = \varphi_0 \cdot \delta_\varphi$) относительно измеряемого значения φ_0 выходит за пределы допустимой погрешности измерений $\Delta\varphi_n = \varphi_0 \cdot \delta_n$, т. е.

$$\tau_{изм} \leq (\tau_{изм})_{пр} = t_{max} - t_{min}. \quad (2.2)$$

В момент $t_{нач}$, определяемый скоростью изменения φ и значением порога чувствительности $\varphi_{нс}$ применяемого средства измерений (СИ), начинается собственно взаимодействие измеряемой величины (объекта измерений) и СИ. При этом инерционные свойства СИ, определяющие его быстродействие, вызывают появление переходного процесса длительностью τ_n (кривая 2), который «отодвигает» возможное начало измерения до момента t'_{min} , когда составляющая погрешности δ_s становится меньше δ_n .

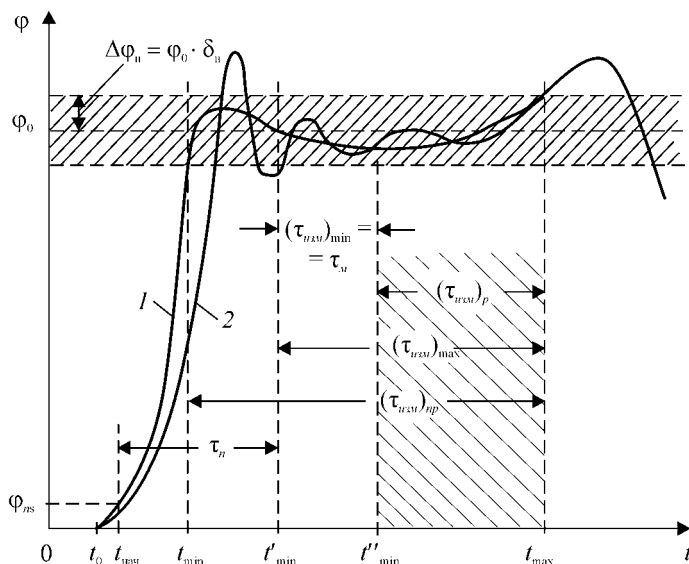


Рис. 2.1. Анализ временных соотношений в процессе измерений:

- 1 — изменение во времени измеряемой величины;
- 2 — переходный процесс в средстве измерений

Таким образом, максимальное время измерения с учетом составляющих δ_ϕ и δ_s определяется условием

$$\tau_{изм} \leq (\tau_{изм})_{\max} = t_{\max} - t'_{\min}. \quad (2.3)$$

Аналогичные рассуждения с использованием составляющих δ_ψ и δ_b приводят к тому, что максимальный интервал времени измерения становится еще более узким. Считая, однако, что эти уточнения не являются принципиальными с точки зрения существа картины и что в метрологической практике стремятся заведомо обеспечить нормальность условий измерений, рассмотрим нижнюю границу интервала времени измерения.

В пределах $(\tau_{изм})_{\max}$ эта граница будет определяться быстродействием отсчетного устройства СИ и органов восприятия оператора-наблюдателя. Если инерционные свойства этих компонентов измерения выразить через «мертвое» время τ_m , то должно выполняться соотношение

$$\tau_{изм} \geq (\tau_{изм})_{\min} = \tau_m. \quad (2.4)$$

Таким образом, рабочий интервал времени измерения $(\tau_{изм})_p$, исходя из условия корректности измерений, должен удовлетворять следующему неравенству:

$$(\tau_{изм})_{\max} \geq (\tau_{изм})_p \geq (\tau_{изм})_{\min}. \quad (2.5)$$

Соотношения (2.1)–(2.5) полезно учитывать при формулировании измерительной задачи, составлении плана измерительного эксперимента и подготовке технического задания на разработку средств измерений.

При создании **системы метрологического обеспечения** необходимо предварительно ответить на ряд вопросов, среди которых основными являются: вид измерений, класс средств измерений, их распространенность и предельно достижимая точность, а также показатели качества; место СМО в системе существующих государственных поверочных схем; набор нормируемых метрологических характеристик и др.

Рассматриваемая аппаратура точной магнитной записи предназначена для регистрации (записи, хранения и воспроизведения) аналоговых (непрерывных во времени) электрических сигналов измерительной информации, т. е. зависимости напряжения электрического тока от времени $U(t)$. Среди известных в настоящее время четырех видов измерений (прямые, косвенные, совокупные и совместные) [85] измерения $U(t)$ относятся к совместным. Согласно определению [152] под совместными измерениями понимаются «производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин **для нахождения зависимости между ними**». Сравнительные характеристики видов измерений приведены в табл. 2.1.

**Сравнительная характеристика видов измерений
(признаком классификации служит способ получения
числового значения измеряемой величины)**

Признаки (Вид измерений)	Число измеряемых физических величин n	Число используемых мер m	Число уравнений измерения P	Закон связи физических величин	Цель измерений
Прямые	$n = 1$	$m = 1$ ($n = m$)	$P = 1$	—	Сравнение измеряемой физической величины с мерой (шкалой)
Косвенные	$n > 1$	$m > 1$ ($n \geq m$)	$P > 1$	Известен	Вычисление значения производной физической величины по известной зависимости от измеряемых величин
Совокупные	$n \geq 1$	$m \geq 1$ ($n \geq m$)	$P \geq 1$	Выбран	Вычисление значений коэффициентов выбранного закона связи физических величин
Совместные	$n > 1$	$m > 1$ ($n = m$)	$P > 1$	Неизвестен	Выявление зависимости (закон связи) между измеряемыми физическими величинами

Характерной особенностью измерения мгновенных значений $U(t)$, в отличие от других видов совместных измерений, является их ярко выраженный динамический характер, так как одна из измеряемых неоднородных величин — это время t , служащее аргументом функциональной зависимости.

В соответствии с разработанным классификатором видов измерений [203] этот вид измерений относится к «напряжениям электрическим средним постоянным и переменным низкой и средней частоты» и имеет обозначение 03.02.01.04.010.13 и 03.02.01.04.(011. + 02323. + 02324.).13.

Структура классификатора основана на учете сложившихся взаимосвязей как между самими физическими величинами, так и между физическими величинами и процессами их измерения:

– соответствие измеряемых физических величин областям физики с выделением групп и отдельных физических величин;

– характеристики измеряемой величины или параметра (уровни и диапазоны);

– специфика решаемой измерительной задачи, связанная с областью применения.

В соответствии с этими классификационными признаками выделены следующие рубрики классификатора.

1. Область измерений (раздел или область физики) — для $U(t)$ это 03. — «электричество и магнетизм».

2. Группа измерений (подраздел области физики) — для $U(t)$ это 0.2. — «электрические цепи».

3. Вид измерений (измеряемая физическая величина или параметр) - для $U(t)$ это 01. — «электрическое напряжение».

4. Диапазон измерений — для $U(t)$ это 04. — «средние значения» (от 10^{-6} до 10^3 В).

5. Условия измерений, включающие:

5.1. характер зависимости от времени — для $U(t)$ это 010. — «статические измерения» (постоянная величина), и 011. — «динамические измерения» (переменная величина), + 02323 и 02324 означают, что частота электрического напряжения (0232) имеет низкие значения (02323. — менее одного килогерца) и средние значения (02324. — от 10^3 до 10^6 Гц);

5.2. зависимость от влияющих величин;

5.3. характеристика среды (агрегатное состояние).

6. Область применения — для метрологического обеспечения измерений — для $U(t)$ это 13. — «измерения для научных исследований и проблем обеспечения единства измерений».

Как было показано в [145], АМЗ, как средство измерений (т. е. «техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства»), относится к классу измерительных преобразователей, так как «предназначена для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем» [152].

Распространенность в стране АМЗ, используемой в качестве блоков измерительных информационных систем и измерительно-вычислительных комплексов, чрезвычайно широка. Достаточно упомянуть серийно выпускаемые Кишиневским заводом «Виброприбор» измерительные магнитографы типа НО-..., многие типы специализированной аппаратуры точной магнитной записи, выпускаемой Киевским НПО «Маяк» малыми

партиями, импортные измерительные магнитофоны фирм «Брюль и Кьер», «Шлюмберже», «Amplex Corporation», «Honeywell», «Philips», «Lockheed», «Winston», «Telefunken», «Teac» и др. [204], а также наметившуюся в стране тенденцию приспособления дешевых массовых бытовых магнитофонов для регистрации сигналов измерительной информации медико-биологического назначения [66].

Учитывая большую распространенность АМЗ и необходимость ее метрологического обеспечения, следует подчеркнуть актуальность создания технических основ СМО в виде средств метрологической аттестации и поверки аппаратуры точной магнитной записи. Создание таких средств требует рассмотрения показателей качества АМЗ, в частности — требований по точности к средствам их поверки. Для начала попытаемся оценить предельно достижимую точность совместных измерений мгновенных значений электрического напряжения $U(t)$. Исходя из известного соотношения неопределенностей для энергии и времени

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h/2, \quad (2.6)$$

где: ΔE и Δt можно рассматривать, как погрешности измерения энергии и времени соответственно, h — постоянная Планка, представим энергию в виде произведения $q \cdot U$. Выбрав в качестве q элементарный заряд (заряд электрона $e \cong 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), формулу (2.6) можно записать в виде

$$\Delta U \cdot \Delta t \geq h/2e \cong 2 \cdot 10^{-15} \text{ В}\cdot\text{с}. \quad (2.7)$$

Подставляя вместо Δt время измерения из (2.5), получим, что предельно достижимая погрешность измерения мгновенного значения напряжения

$$\Delta U \geq \frac{h}{2e \cdot \tau_{\text{изм}}}, \quad (2.8)$$

т. е., для примера, при $\tau_{\text{изм}} = 1 \cdot 10^{-6}$ с $\Delta U \geq 2 \cdot 10^{-9}$. Это коррелирует с теорией, развитой в [78], где показано, что энергетический порог чувствительности средства измерений пропорционален его погрешности γ , мощности P , потребляемой от объекта измерений, и времени t установления результата измерений и не может быть уменьшен ниже $C = 3,5 \cdot 10^{-20}$ Дж:

$$\gamma^2 \cdot P \cdot t \geq C. \quad (2.9)$$

В большинстве типов АМЗ динамический диапазон каналов (т. е. отношение сигнал / шум) не превышает 60 дБ и при верхней границе амплитудного диапазона на уровне единиц вольт вопрос о предельно достижимых точностях регистрации, естественно, не возникает.

К **показателям качества** АМЗ, как средства измерений, в соответствии с [205–207] относятся показатели назначения, надежности, экономного использования сырья, материалов, энергии и трудовых ресурсов, эргономические, эстетические, технологичности, транспортабельности, стандартизации и унификации, патентно-правовые, экологические и показатели безопасности.

Показатели назначения, характеризующие основные функции аппаратуры и область ее применения, подразделяются на показатели функциональные и технической эффективности, а также конструктивные показатели. К **показателям функциональным и технической эффективности** АМЗ относятся важнейшие ее технические и метрологические характеристики, включающие амплитудный и частотный диапазон регистрируемых сигналов, показатели точности, быстродействия и автоматизации, совместимость с объектом измерений (в смысле отбираемой от него мощности), универсальность, приспособленность к поверке и др.

При оценке технического уровня продукции, впрочем как и организационно-технических систем (например, АМЗ — как средства измерений, или СМО — как разновидности больших систем), возникает необходимость в получении обобщенного (интегрального) показателя качества, в отличие от перечисленных выше частных показателей. В этом случае квалиметрия [207] предлагает различные алгоритмы «объединения» частных показателей качества, среди которых наиболее широкое распространение получил способ их «взвешенного» суммирования. Трудная задача обоснованного выбора весовых коэффициентов решается, как правило, назначением их экспертным методом.

Аналогичная ситуация возникает при многокритериальной оптимизации, когда объекты (системы), оптимальные по одному из критериев, далеки от оптимальности по другим (другому) критерию. Задача еще более усложняется в случае, когда информация о параметрах объекта (или системы) является неполной (нечеткой, «размытой», недостаточно определенной), что весьма часто встречается на практике также как, например, и при принятии решения в условиях неполной исходной информации.

Понятие качества для сложных организационно-технических систем, связанных с проведением точных измерений и их метрологическим обеспечением («метрологических систем»), может относиться как к системе в целом, т. е. к ее структуре, функционированию, пригодности к использованию, так и к отдельным свойствам системы: надежности, устойчивости, эффективности и, соответственно, определяется по-разному [208, 209]. Под качеством метрологической системы будем понимать ее оптимальность в каком-либо отношении, с точки зрения достижения определенной

цели, решения измерительной (метрологической) задачи, а под критерием качества — показатель оптимальности. При любом определении качества системы выражается через совокупность факторов количественных (объективных) и качественных (субъективных), не поддающихся непосредственной метризации, например: простота, удобство, красота и т. п. Оценка качества поэтому связана с ранжированием систем по некоторому набору объективных и субъективных признаков, зависящему от цели или решаемой задачи [210–212].

Определим «порог качества», как гарантированное качество, характеризующее определенный уровень достижения цели или решения задачи, и включим в это понятие следующие показатели (факторы): точность, выражаемую через погрешность δ_0 , достоверность, характеризующую вероятность P_0 , быстрдействие в виде времени измерения τ_0 , ресурс T_0 , определяемый временем пригодности системы для решения задачи, полноту α_0 , отражающую степень удовлетворения потребностей субъекта. Каждый из этих факторов может включать объективные и субъективные составляющие.

Для обеспечения определенного качества (достижения цели) на множестве систем должны выполняться условия реализации в виде совокупности неравенств:

$$\delta \leq \delta_0, P \geq P_0, \tau_{\text{изм}} \leq \tau_0, T \geq T_0, \alpha \geq \alpha_0. \quad (2.10)$$

Из (2.10) следует, что оценка качества является, в общем случае, задачей многокритериальной оптимизации. Формализация понятия качества связана с выбором некоторой совокупности аксиом (условий), зависящих от структуры решаемой задачи и вида системы. Выбор аксиом определяет общие ограничения, накладываемые на способ описания понятия качества. Потребуем, к примеру, выполнения следующих аксиом.

1. Если $\Sigma_i \subset \Sigma$, то $K(\Sigma_i) \leq K(\Sigma)$.

Она означает, по- существу, что качество «измеряется» в шкале порядка.

2. Если $\Sigma = \Sigma_1 \oplus \Sigma_2 \oplus \dots \oplus \Sigma_n$, то $K(\Sigma) \geq \max_i K(\Sigma_i)$, $1 \leq i \leq n$ (параллельное соединение систем), где $K(\Sigma)$ — качество системы Σ .

3. Если $\Sigma = \Sigma_1 \otimes \Sigma_2 \otimes \dots \otimes \Sigma_n$, то $K(\Sigma) \geq \min_i K(\Sigma_i)$, $1 \leq i \leq n$ (последовательное соединение систем).

Вторая и третья аксиомы композиции позволяют рассчитывать качество систем по их компонентам в простейших случаях.

4. Если имеются две взаимодействующие системы Σ_1 и Σ_2 , то $K(\Sigma_1 \overset{\leftrightarrow}{\otimes} \Sigma_2) \geq \max \{K(\Sigma_1 \leftrightarrow \Sigma_2), \min [K(\Sigma_1), K(\Sigma_2)]\}$, где $K(\Sigma_1)$, $K(\Sigma_2)$ — качество каждой из систем, а $K(\Sigma_1 \leftrightarrow \Sigma_2)$ — качество обратной связи (взаимодействия).

Приведенная совокупность аксиом не является единственно возможной, так как ее выбор зависит от цели (решаемой задачи) и вида систем. Например, для таких характеристик качества, как точность (погрешность) и время решения задачи (время измерения) справедливы законы (max-sum)-композиции, для достоверности — законы сложения и умножения вероятностей и т. д. Поскольку оценка качества всегда содержит субъективные составляющие и, кроме того, неизвестно точно их влияние на конечный результат, то использование обычных методов для формализованного описания понятия качества ограничено. Оно может быть проведено с помощью математического аппарата теории нечетких множеств [213–215].

Обозначим множество метрологических систем m . Его элементами могут быть отдельные измерения, средства измерений, поверочные схемы, а также другие объекты типа системы обеспечения единства измерений или системы метрологического обеспечения.

Пусть $\{m^i\}$ — подмножество однородных систем i -го класса: $\{m^i\} \in m$, а $m_k^i \in \{m^i\}$ — k -ая система i -го класса; $1 \leq i \leq n$ (где: n — число классов метрологических систем).

Для каждого подмножества $\{m^i\}$ рассмотрим множество его отображений $L_i^{\{m^i\}}$ в L_i , где: L_i — некоторое множество типа решетки, упорядоченное или частично упорядоченное, элементы которого имеют нижнюю и верхнюю границы [215]. Множество L_i связано с набором оценок качества элементов подмножества $\{m^i\}$ и, вообще говоря, для различных $\{m^i\}$ может иметь разную структуру. Определим теперь на $L_i^{\{m^i\}}$ нечеткое подмножество $m^i = \{m_k^i, \lambda_{mi}(m_k^i)\}$, характеризующее систему определенного качества, которое каждому элементу $m_k^i \in \{m^i\}$ ставит в соответствие элемент $\lambda_{mi}(m_k^i) \in L_i$ (элемент λ_{mi} является оценкой качества системы m_k^i). Оценка качества подмножества $\{m^i\}$ зависит от оценок качества его элементов m_k^i . Таким образом, множеству m ставится в соответствие множе-

ство нечетких подмножеств (их произведение): $\prod_{i=1}^n L_i^{\{m^i\}}$, характеризующих системы определенного качества, функции принадлежности которых принимают значения соответственно в L_1, L_2, \dots, L_n . Структура множества L_i зависит от совокупности аксиом, определяющих понятие качества. Например, решетка L_i может быть векторной решеткой, образованной произведением множеств, соответствующих критериям «порога качества»:

$$L_i = L_i^{(1)} \cdot L_i^{(2)}, \dots, L_i^{(5)}, \quad (2.11)$$

где: $L_i^{(1)}$ — множество оценок точности, $L_i^{(2)}$ — множество оценок достоверности, и т. д.

В частном случае каждое $L_i^{(k)}$ (значит и L_i) может быть числовым интервалом $[0, 1]$.

Рассмотрим в качестве одного из примеров оценку качества возможной поверочной схемы для АМЗ (рис. 2.2а), структура которой содержит три уровня: первый уровень — исходные (для данной поверочной схемы) образцовые средства измерений, заимствованные из существующих государственных поверочных схем для государственного первичного эталона единицы электродвижущей силы [216] (или государственного специального эталона единицы напряжения 0,1–10 В в диапазоне частот $20 \div 3 \cdot 10^7$ Гц [217]) и для Государственного первичного эталона единиц времени и частоты [218]; второй уровень — образцовые средства измерений; третий уровень — рабочие средства измерений (различные типы аппаратуры точной магнитной записи). Соответствующее ей L — отображение представлено на рис. 2.2б, где $\lambda_{j(r)}$ — оценка качества подсистем; $\lambda_{j(r)} \in L_i$.

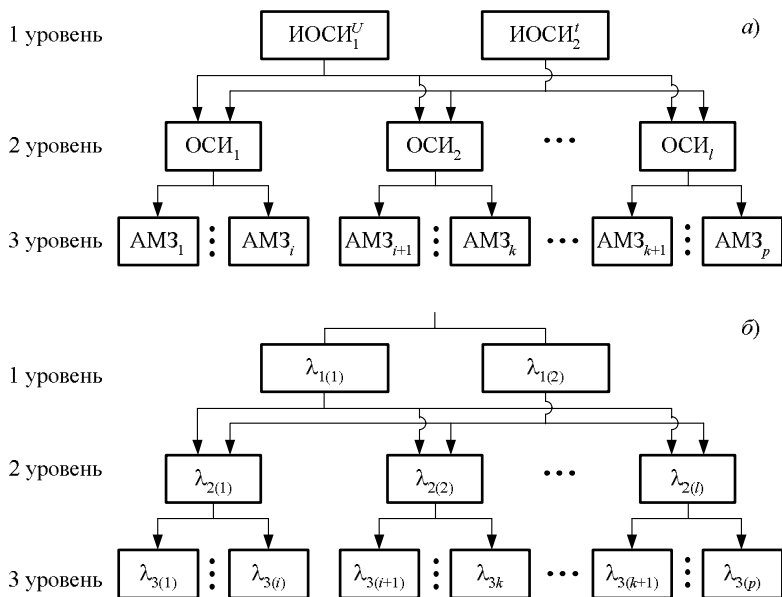


Рис. 2.2. Пример оценки качества возможной поверочной схемы для аппаратуры точной магнитной записи

ИОСИ $_1^U$ — исходное образцовое средство измерений из государственной поверочной схемы государственного первичного эталона единицы электродвижущей силы (или государственного специального эталона единицы напряжения);
 ИОСИ $_1^I$ — исходное ОСИ из ГПС для ГПЭ единиц времени и частоты

Оценку качества такой поверочной схемы можно определить по формуле:

$$K = \left. \begin{array}{l} \lambda_{1(1)} \\ \lambda_{1(2)} \end{array} \right\} \wedge \left\langle \left\{ \lambda_{2(1)} \wedge [\lambda_{3(1)} \vee \dots \vee \lambda_{3(i)}] \right\} \vee \left\{ \lambda_{2(2)} \wedge [\lambda_{3(i+1)} \vee \dots \vee \lambda_{3(k)}] \right\} \vee \dots \right. \\ \left. \dots \vee \left\{ \lambda_{2(l)} \wedge [\lambda_{3(k+1)} \vee \dots \vee \lambda_{3(p)}] \right\} \right\rangle, \quad (2.12)$$

где: символы \vee и \wedge — обозначают операции взятия верхней и нижней границ, определенных на решетке L_i . Из (2.12) можно сделать некоторые выводы. Качество системы определяется, прежде всего, совокупностью $\lambda_{1(1)}$ и $\lambda_{1(2)}$, т. е. оценкой заимствованных исходных образцовых средств измерений, а также оценками качества низшего (третьего) уровня системы. Качество каждой из ветвей схемы не улучшается от добавления дополнительных уровней; увеличение числа параллельных ветвей, т. е. увеличение числа образцовых средств измерений не ухудшает качества системы.

Для упрощения выражения (2.12) необходимо знать отношение порядка между $\lambda_{j(r)}$. Предположим, что удалось проранжировать элементы системы таким образом, чтобы $\lambda_{j(r)}$ были связаны следующим отношением порядка:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_{1(1)} \\ \lambda_{1(2)} \end{array} \right\} > \lambda_{2(1)} \geq \lambda_{2(2)} \geq \dots \geq \lambda_{2(l)} > \lambda_{3(1)} \geq \dots \geq \lambda_{3(i)} \geq \lambda_{3(i+1)} \geq \dots \\ \dots \geq \lambda_{3(k)} \geq \lambda_{3(k+1)} \geq \dots \geq \lambda_{3(p)}. \quad (2.13)$$

Тогда из (2.12) получим:

$$K = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{1(1)} \\ \lambda_{1(2)} \end{array} \right\} \wedge \lambda_{3(1)} = \lambda_{3(1)} \quad (2.14)$$

В этом случае качество системы зависит от качества ее (лучших типов-представителей) низшего звена.

В качестве другого примера рассмотрим алгоритм сравнения качества однородных систем, понимая под системой некоторый тип аппаратуры точной магнитной записи (отметим при этом, что аналогичное сравнение возможно и для разнородных систем, взаимосвязь которых плохо поддается описанию и не может быть представлена простой структурной схемой).

Пусть x_1^i, x_2^i — два типа АМЗ из их множества $\{x^i\}$, которые надо сравнить по качеству.

Запишем два нечетких подмножества, связанные с оценкой качества систем

$$\begin{aligned}
 x_1^i &= \begin{matrix} x_{1(1)}^i & x_{1(2)}^i & \dots & x_{1(n)}^i \\ \lambda_{1(1)} \in L_i^{(1)} & \lambda_{1(2)} \in L_i^{(2)} & \dots & \lambda_{1(n)} \in L_i^{(n)} \end{matrix} \\
 x_2^i &= \begin{matrix} x_{2(1)}^i & x_{2(2)}^i & \dots & x_{2(n)}^i \\ \lambda_{2(1)} \in L_i^{(1)} & \lambda_{2(2)} \in L_i^{(2)} & \dots & \lambda_{2(n)} \in L_i^{(n)} \end{matrix}, \quad (2.15)
 \end{aligned}$$

где $x_{1(k)}^i, x_{2(k)}^i$ — частные показатели технической эффективности, функциональные и конструктивные (т. е. показатели назначения, хотя сравнение можно провести и по всем показателям). При этом под функциональными показателями понимается наличие одновременного или разновременного режимов записи и воспроизведения, наличие возможности транспонирования скорости носителя при воспроизведении относительно скорости его при записи, наличие или отсутствие возможности записи сигнала измерительной информации на «кольцо» магнитного носителя для его многократного считывания при воспроизведении с целью анализа параметров сигнала, и др. Технические показатели АМЗ включают в себя вид используемой записи (прямая или один из видов модуляционного преобразования сигнала таких, как: амплитудная, балансно-амплитудная, частотная, фазовая, амплитудно-импульсная, частотно-импульсная, фазо-импульсная, широтно-импульсная и дельта-модуляция), скорость протяжки носителя, время записи, количество каналов (дорожек), тип носителя (магнитная лента, металлическая лента, проволока и др.), плотность записи (продольная, поперечная, поверхностная), коэффициент колебаний и дрейфа скорости носителя, потребляемая мощность и параметры сети питания, и т. д. К конструктивным показателям относятся масса АМЗ, габариты, емкость кассеты и ширина ленты, элементная база, вид исполнения (бортовая, стационарная, переносная, выполненная в одном корпусе или в виде отдельных блоков записи и аппаратуры воспроизведения) и др. Метрологические характеристики АМЗ рассмотрены в 2.2.

Компоненты $x_{1(k)}^i, x_{2(k)}^i$ могут оцениваться по различным критериям и их оценки $\lambda_{1(k)}, \lambda_{2(k)}$, соответственно, принимать значения в множествах $L_i^{(k)}$, имеющих разную структуру. Для получения сравнительной оценки качества применима следующая схема.

Представим структуру каждого $L_i^{(k)}$ в виде простого графа и определим уровни порядка.

Определим расстояния в каждом графе, соответствующие различным критериям (компонентам):

$$D_k^{(i)} = \left| N_{1(k)}^i - N_{2(k)}^i \right|, \quad (2.16)$$

где: $N_{1(k)}^i, N_{2(k)}^i$ — уровни порядка оценок для $x_{1(k)}^i, x_{2(k)}^i$.

Подсчитаем относительные расстояния между элементами

$$\Delta_{(k)}^i = \frac{D_k^{(i)}}{N_{0i}^{(k)}}, \quad (2.17)$$

где: $N_{0i}^{(k)}$ — число уровней порядка в $L_i^{(k)}$.

Присвоим каждому $\Delta_{(k)}^i$ знак «+» или «-» в соответствии со знаком разности $N_{1(k)}^i - N_{2(k)}^i$:

$$\lambda_{(k)}^i(x_1^i, x_2^i) = \pm \Delta_{(k)}^i. \quad (2.18)$$

В результате получим таблицу

$$\lambda_{1,2}^i = \begin{matrix} x_{(1)}^i & x_{(2)}^i & \dots & x_{(n)}^i \\ \lambda_{(1),2}^i & \lambda_{(2),2}^i & \dots & \lambda_{(n),2}^i \end{matrix}. \quad (2.19)$$

Значение $\lambda_{(k),2}^i$ можно рассматривать как относительную разность оценок качества компонент $x_{1(k)}^i, x_{2(k)}^i$, а его знак показывает, какая оценка больше.

Найдем относительное обобщенное расстояние между нечеткими множествами x_1^i, x_2^i :

$$\delta(x_1^i, x_2^i) = \left| \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \lambda_{(k)}^i(x_1^i, x_2^i) \right|. \quad (2.20)$$

Присвоим каждому δ знак в соответствии со знаком суммы $\sum_{k=1}^n \lambda_{(k)}^i(x_1^i, x_2^i)$:

$$\delta^* = \pm \delta. \quad (2.21)$$

Значение δ^* можно рассматривать как относительную разность оценок качества двух сравниваемых систем. Следует отметить, что $\delta^* = 0$ соответствует одинаковому их качеству, а $\delta^* = \pm 1$ — максимальному различию.

Из анализа следует, что удобно сравнивать разности оценок качества систем, а не сами оценки, т. е. оценивать качество в шкале интервалов. Рассмотренная схема может быть обобщена на случай нескольких систем [212]. Она сводится к решению задачи многокритериальной оптимизации по критериям качества на множестве систем, заключающейся в выборе системы, имеющей, по возможности, максимальные оценки по всем критериям и удовлетворяющей условиям реализации вида (2.10).

Задача разбивается на два этапа: построение отношений нечеткого предпочтения на множестве систем по критериям качества и агрегирование полученных отношений. В реальном случае сложность ее решения связана с тем, что пороговые значения критериев качества не заданы точно, а оказываются «размытыми» так же, как и оценки качества рассматриваемых систем. Ширина «области размытия» определяется неполнотой (нечеткостью) исходной информации о цели или решаемой задаче.

2.2. Метрологические характеристики аппаратуры точной магнитной записи и их нормирование

Под метрологическими характеристиками аппаратуры точной магнитной записи понимаются такие ее характеристики, которые непосредственно влияют и определяют точность регистрации сигналов измерительной информации и относятся к «сквозному» каналу АМЗ, включающему в себя электронные преобразователи, используемые при записи, систему магнитная головка-носитель и электронные преобразователи, используемые при воспроизведении.

Анализ свойств АМЗ, рассматриваемой как измерительный преобразователь, основывается на ее математическом описании, представляющем абстрактную модель преобразователя. При этом, прежде всего, представляет интерес качество выполнения им определенных функций, количественной характеристикой которого является погрешность преобразования.

Основной функцией АМЗ, как блока измерительных информационных систем, является запись (запоминание), хранение и воспроизведение информации без искажений. Это предполагает, что АМЗ является линейной стационарной системой, осуществляющей преобразование подобия или, в более общем случае [145], преобразование в шкале интервалов, удовлетворяющее следующему уравнению связи выходного $y(t)$ и входного $x(t)$ сигналов:

$$y(t) = A \{x(t)\} = K \cdot x(bt - \tau) + d, \quad (2.22)$$

где: A — оператор преобразования; K — коэффициент передачи (преобразования амплитудного масштаба); b — коэффициент преобразования

временного масштаба; τ — время задержки (запаздывания) сигнала; d — значение постоянной составляющей, необходимость в которой возникает при регистрации переменного центрированного сигнала по каналу, амплитудный диапазон которого несимметричен относительно нуля (например, от 0 до +6,3 В).

На практике реальные параметры модели (2.2.1) K_p, b_p, τ_p, d_p отличаются от идеальных и номинальных (паспортных) параметров K_n, b_n, τ_n, d_n , что приводит к погрешности преобразования

$$\Delta y(t) = y_p - y_n = [K_p \cdot x(b_p t - \tau_p) + d_p] - [K_n \cdot x(b_n t - \tau_n) + d_n]. \quad (2.23)$$

Из (2.2.2) видно, что погрешность регистрации (преобразования) $\Delta y(t)$ зависит как от несовпадения реальных и номинальных параметров АМЗ, так и от вида (характеристик) входного сигнала измерительной информации $x(t)$.

При этом разность коэффициентов передачи

$$\Delta K = K_p - K_n \quad (2.24)$$

«распадается» на следующие составляющие:

- нелинейность амплитудной характеристики, приводящая к нелинейным искажениям;

- несоответствие угла наклона амплитудной характеристики номинальному, соответствующее ненормальности чувствительности канала и приводящее к искажению амплитудного масштаба выходного сигнала и появлению мультипликативной помехи;

- «смещение нуля», воспринимаемое так же, как $\Delta d = d_p - d_n$, и образующее аддитивную помеху;

- ненормальность полной динамической характеристики канала в частотной или временной области, обуславливающая динамические искажения.

Разность $\Delta b = b_p - b_n$ и $\Delta \tau = \tau_p - \tau_n$ приводит к искажениям временного масштаба выходного сигнала, причем Δb соответствует скольжению (дрейфу скорости) носителя, а $\Delta \tau$ — колебаниям времени запаздывания воспроизводимого сигнала.

Разность $\Delta d = d_p - d_n$ соответствует уровню помех в канале и включает в себя шум электронных блоков записи и воспроизведения, паразитную амплитудную модуляцию, шум ленты, обусловленный ее зернистостью, а также дефектами и повреждениями, помехи: фоновые, переходные, из-за эффектов: копировального, проникновения, саморазмагничивания и др.

Кроме того, необходимо учитывать конечность входного и выходного импедансов канала, поскольку не бесконечно большое входное сопротивление приводит к нарушению состояния объекта, свойство которого надо

измерить, а не бесконечно малое выходное сопротивление канала может нарушить нормальное взаимодействие АМЗ со следующим блоком измерительной информационной системы; вместе же они приводят (как и ненормальность чувствительности) к искажению амплитудного масштаба выходного сигнала.

Учитывая изложенное, метрологическую модель образования результирующей погрешности в канале АМЗ можно изобразить в виде эквивалентной схемы, приведенной на рис. 2.3. и содержащей стационарное звено, представленное линейным оператором L (оператор линейаризованного канала, учитывающий несоответствие угла наклона АХ номинальному, ненормальность полной динамической характеристики и конечность входного и выходного импедансов канала) и нелинейным оператором H (соответствующим нелинейности АХ), звено переменного запаздывания D (отражающее влияние Δb и $\Delta \tau$) и источник аддитивного шума e (включающий в себя «смещение нуля» и Δd).

Таким образом, кроме функции преобразования, амплитудного и частотного диапазонов регистрируемого сигнала, в перечень метрологических характеристик [75] АМЗ, подлежащих нормированию, должны входить:

- 1) нелинейность амплитудной характеристики;
- 2) ненормальность полной динамической характеристики;
- 3) уровень помех;
- 4) изменения времени запаздывания;
- 5) конечность входного и выходного импедансов канала;
- 6) результирующая основная и дополнительные погрешности преобразования с выделением систематической и случайной их составляющих, а также функции влияния условий окружающей среды, выходящих за пределы области нормальных значений.

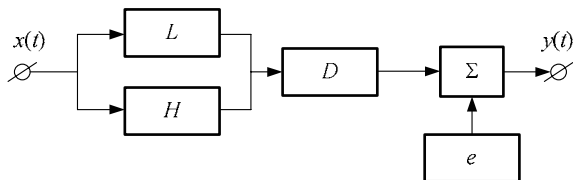


Рис. 2.3. Модель образования результирующей погрешности регистрации сигнала измерительной информации в канале аппаратуры точной магнитной записи
 $x(t)$ — входной сигнал; L — оператор линейаризованного канала;
 H — нелинейный оператор; D — звено переменного запаздывания;
 e — источник аддитивного шума; Σ — линейный сумматор;
 $y(t)$ — выходной сигнал

Зная вид или характеристики входного сигнала $x(t)$ по метрологическим характеристикам 1) – 5) можно оценить соответствующие частные составляющие результирующей погрешности 6). Все перечисленные метрологические характеристики и характеристики погрешности АМЗ являются инструментальными, т. е. относятся к средству измерений. При проведении измерений, кроме них, необходимо учитывать также методические погрешности и погрешности оператора (в том числе грубые — «промахи»).

Степень заинтересованности в знании этих параметров различна (см. табл. 2.2) у разных категорий лиц, участвующих в отдельных стадиях «жизненного цикла» аппаратуры точной магнитной записи, таких как: а) разработчик, б) изготовитель, в) потребитель (при этом целесообразно различать: потребителя, осуществляющего «технические измерения» в промышленности, и потребителя, проводящего научные исследования с применением АМЗ); г) персонал, занимающийся ремонтом аппаратуры, д) поверитель (метролог, контролер качества).

Для оценивания характеристик погрешности, как результирующей, так и ее частных составляющих, необходимо задаться или выбрать вид испытательного сигнала. Проблема выбора оптимального испытательного сигнала решается с применением методов теории планирования эксперимента [219, 220] и преследует цель получения параметров модели динамического объекта, наименее чувствительной к случайным помехам. При этом:

- D-оптимальным является такой испытательный сигнал, который минимизирует определитель ковариационной матрицы оценок неизвестных коэффициентов динамической модели (объем эллипсоида рассеяния таких оценок минимален);

- A-оптимальным называют сигнал, минимизирующий след, а

- E-оптимальным — максимальное собственное число ковариационной матрицы.

С метрологической точки зрения к выбору вида испытательного сигнала предъявляются следующие требования:

- он должен быть максимально близким по своим параметрам к реальным регистрируемым сигналам, если они заранее известны и параметры их заданы и неизменны. В противном случае испытательный сигнал должен быть «худшим», т. е. таким, который обеспечивает оценку погрешности регистрации «сверху»;

- параметры испытательного сигнала должны быть легко воспроизводимыми, стабильными во времени, с малой зависимостью от воздействия влияющих величин (факторов), обеспечивающими возможность синхронизации его при считывании и удобными в аппаратурной реализации;

Таблица 2.2

**Заинтересованность (+) различных специалистов
в знании нормированных метрологических характеристик**

Метрологические характеристики	Погрешность		Функция	НМХ (1)–(5)	Частные составляющие инструментальной погрешности	Методическая погрешность	Погрешность оператора	Применение
	основная	дополнительная						
Контингент специалистов	+							
Работодчик	+	+	+	+	+	-	-	Оговаривается в ТЗ на разработку
Изготовитель АМЗ	+	+	+	+		-	-	Отражается в ТУ на изделие
Потребитель в промышленности	+	+	-	-		+	+	Зависит от условий применения АМЗ
Потребитель-исследователь	+	+	+	+		+	+	
Ремонтник	+	+	-	-		-	-	В соответствии с требованиями договора на ремонт
Поверитель (контролер качества)	+	+	+	+	+	-	-	Определяется наличием соответствующей поверочной аппаратуры

– достаточно просто должна осуществляться «привязка» параметров испытательных сигналов к соответствующим образцовым средствам измерений из существующих государственных поверочных схем для передачи размера единиц от эталонов к генераторам испытательного сигнала, служащим «образцовой мерой» при метрологической аттестации и поверке АМЗ.

В [221] показано, что D-оптимальным испытательным сигналом для объектов, на выходе которых имеется аддитивный шум («белый» или «цветной» с известной корреляционной функцией), является сигнал с конечной и постоянной мощностью, представляющий собой аппроксимацию белого шума в полосе частот объекта. К классу таких сигналов, удовлетворяющих также перечисленным выше требованиям, относится псевдослучайная двоичная последовательность максимальной длины (коды Хаффмена или M-последовательности) с δ -образной автокорреляционной функцией, вид которой приведен на рис. 2.9. [222–226].

Выбор такого сигнала в качестве испытательного соответствует подходу, развитому в [145] для расчета результирующей погрешности регистрации по частным ее составляющим. Необходимость в разработке методики расчета результирующей погрешности канала АМЗ по частным составляющим была продиктована, в частности, тем, что в то время (в 1973 году) в мировой практике не было предложено метода и средств измерений для экспериментального определения результирующей погрешности преобразования сигнала в каналах АМЗ. Сущность методики заключается в суммировании мощностей динамических (линейных), нелинейных и шумовых искажений, которые полагались независимыми центрированными эргодическими случайными процессами, для получения дисперсии результирующей погрешности.

При этом нормировались [227–230] приведенные погрешности по частным составляющим, которые зависят как от перечисленных выше метрологических характеристик АМЗ, так и от выбранных параметров испытательного сигнала. Такой подход является «интегральным» и не противоречит нормированию отдельных метрологических характеристик без учета параметров испытательного сигнала.

Нормирование метрологических характеристик средства измерений (в частности, АМЗ) наиболее сложно в том случае, когда МХ представляет собой функцию (зависимость от аргумента), например, амплитудно- и фазо-частотные характеристики, импульсная весовая функция и т. д. [230–232].

В [145, 234] был предложен способ нормирования динамических характеристик линейных измерительных преобразователей с использовани-

ем моментов его импульсной весовой функции и показано, что динамическая погрешность

$$\Delta_x(t) = \sum_{i=2}^{\infty} \mu_i \cdot x^{(i)}, \quad (2.25)$$

где $x^{(i)}$ — i -я производная входного сигнала $x(t)$,

$$\mu_i = \frac{m_i}{(-1)^i \cdot i!}; \quad (2.26)$$

μ_i — i -й модифицированный момент ИВФ, $i = 0, 1, \dots$,

$$m_i = \int_0^{\infty} t^i \cdot q(t) dt \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.27)$$

i -й момент ИВФ;

$q(t)$ — импульсная весовая функция исследуемого измерительного канала, характеризующая реакцию $y(t)$ на импульсное воздействие $x(t) = \delta(t)$:

$$y(t) = \int_0^{\infty} q(\tau) \cdot x(t - \tau) d\tau. \quad (2.28)$$

Известно [75, 233, 235], что полными динамическими характеристиками аналоговых средств измерений, кроме ИВФ, являются передаточная функция $G(p)$, связанная с ИВФ $q(t)$ преобразованием Лапласа:

$$G(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} q(t) dt, \quad (2.29)$$

дифференциальное уравнение и др.

Кроме этих «внешних» (вход-выходных) математических описаний конечномерных линейных систем, все чаще используются «внутренние» описания, т. е. описания в пространстве состояний с учетом внутренних переменных системы s_1, \dots, s_n :

$$S = A \cdot S + b \cdot x; y = c \cdot s, \quad (2.30)$$

где S — вектор состояния системы; A — квадратная матрица n -го порядка с постоянными элементами a_{ij} ; $b = [b_1, \dots, b_n]^T$ — постоянный вектор-столбец; $c = [c_1, \dots, c_n]$ — постоянная вектор-строка.

Внутреннее описание более подробно, чем внешнее, так как несет информацию о структуре системы (число параметров для внутреннего описания $N = n^2 + 2n$, в то время как для внешнего описания используется только $2n$ параметров). Связь между импульсной весовой функцией $q(t)$ и

передаточной функцией $G(p)$ с параметрами уравнений состояния системы характеризуется следующими соотношениями:

$$q(t) = c \cdot e^{At} \cdot b, \quad (2.31)$$

$$G(p) = c (pE - A)^{-1} \cdot b, \quad (2.32)$$

где E — единичная матрица.

Альтернативными моментам ИВФ параметрами, эквивалентными им в смысле полноты описания динамических свойств линейных систем, являются Марковские параметры (МП) h_i [237]:

$$h_i = q^{(i)}(0); \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.33)$$

где: $q^{(i)}(0)$ — i -я производная импульсной весовой функции при $t = 0$,

$$q(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{h_i \cdot t^i}{i!}. \quad (2.34)$$

Марковские параметры являются элементами Ганкелевой матрицы H , представляющей собой произведение транспонированной матрицы наблюдаемости системы D^T на ее матрицу управляемости R :

$$H = D^T \cdot R. \quad (2.35)$$

Связь Марковских параметров с передаточной функцией и с параметрами уравнений состояния (2.29) характеризуется соотношениями:

$$G(p) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{h_i}{p^{i+1}}. \quad (2.36)$$

$$h_i = c \cdot A^i \cdot b; \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.37)$$

Взаимосвязь уравнений, позволяющих по известным модифицированным моментам (2.26) импульсных весовых функций μ_i находить ее Марковские параметры (и обратно), представлена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

...	$c \cdot A^{-3} \cdot b$	$c \cdot A^{-2} \cdot b$	$c \cdot A^{-1} \cdot b$	$c \cdot b$	$c \cdot A \cdot b$	$c \cdot A^2 \cdot b$...
...	μ_2	μ_1	μ_0	h_0	h_1	h_2	...

Моменты импульсных весовых функций хорошо описывают систему в режимах, близких к установившимся (т. е. в низкочастотной области), в то время как Марковские параметры — в переходных режимах (т. е. в высокочастотной области). В бесконечной последовательности моментов

ИВФ μ_i (также, как и Марковских параметров h_i), соответствующей конечномерной линейной системе n -го порядка, только $2n$ членов являются независимыми. Другими словами, систему ранга n полностью характеризуют $2n$ моментов ИВФ (или $2n$ Марковских параметра). При этом совпадение моментов (Марковских параметров) гарантирует совпадение импульсных весовых функций и наоборот. Интересно отметить, что Марковскими параметрами систем с дискретным временем являются просто значения ее импульсной весовой функции в последовательные моменты времени:

$$h_i = q(i); i = 0, 1, 2, \dots \quad (2.38)$$

Поскольку Марковские параметры дискретных систем численно равны «пошаговым» значениям импульсной весовой функции, представляет интерес ответ на вопрос, нельзя ли непрерывную (аналоговую) конечномерную линейную систему характеризовать аналогичными «пошаговыми» значениями ИВФ и какой при этом должен быть «шаг», т. е. интервал времени между соседними значениями ИВФ (которые можно условно принять за Марковские параметры).

Принимая во внимание (2.33) и (2.37), условие совпадения Марковских параметров для дискретных и непрерывных систем можно записать в виде:

$$q(i) = q^{(i)}(0). \quad (2.39)$$

В качестве примера рассмотрим ИВФ резонансного контура с бесконечно высокой добротностью. Для такой системы $q(t)$ представляет собой незатухающее синусоидальное колебание с периодом, соответствующим собственной резонансной частоте контура, т. е.

$$q(t) = \sin \omega_0 t. \quad (2.40)$$

Последовательно дифференцируя (2.2.19), получим:

$$\left. \begin{aligned} q'(t) &= \cos \omega_0 t & q'(0) &= h_1 = 1 \\ q''(t) &= -\sin \omega_0 t & q''(0) &= h_2 = 0 \\ q'''(t) &= -\cos \omega_0 t & q'''(0) &= h_3 = -1 \\ q^{iv}(t) &= \sin \omega_0 t & q^{iv}(0) &= h_4 = 0 \\ \hline q^v(t) &= \cos \omega_0 t & q^v(0) &= h_5 = 1 \\ \dots \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

и далее значения h_i равны четырем значениям [1, 0, -1, 0]. Таким образом, для полной характеристики идеального резонансного контура достаточно четырех Марковских параметров с «шагом», равным четверти периода его собственной частоты, т. е. $2n$ Марковских параметра равно 4. Это соответствует порядку $n = 2$ дифференциального уравнения, описывающего контур.

Экстраполируя такой подход на непрерывные системы с диссипацией, описываемые более сложными дифференциальными уравнениями (конечного порядка), можно предположить, что отсчеты ИВФ целесообразно брать через четверть периода верхней граничной частоты ее рабочей полосы пропускания, а порядок дифференциального уравнения, описывающего систему, можно оценить как половину суммы числа экстремумов ИВФ и числа пересечений (без точки $t = 0$) ею оси абсцисс (вплоть до уровня, когда значения ИВФ перестают превышать уровень погрешности их измерения, или до начала циклического повторения МП), что соответствует [238].

Для конечномерной линейной системы бесконечные ряды в формулах (2.25–2.27, 2.33, 2.34, 2.37–2.39) превращаются в конечные суммы. С учетом взаимнооднозначного соответствия моментов ИВФ и Марковских параметров, следующего из (2.34), можно сделать вывод о том, что нормировать динамические характеристики этими параметрами одинаково удобно и более экономно, поскольку задать $2n$ параметров проще, чем поточечно нормировать значения весовой или передаточной (АЧХ и ФЧХ) функции от непрерывного аргумента.

Конечным результатом проведения совместных измерений является получение (построение) функциональных зависимостей измеряемых величин $U = f(t)$. Решение такой измерительной задачи предполагает, вообще говоря, использование ряда моделей: модели исследуемого процесса (объекта); теоретических модельных представлений, определяющих взаимосвязь исследуемых величин; модели (плана) эксперимента, а также их синтез на основе исходных данных для получения модели процесса измерения, удовлетворяющей необходимым требованиям. Построение общей модели сводится, таким образом, к решению многокритериальной задачи оптимизации.

Известные процедуры оптимизации основаны, как правило, на использовании метода максимального правдоподобия или его модификаций (метода наименьших квадратов, метода наименьших модулей и т. п.). Последующий выбор наилучшей модели осуществляется по результатам сравнения суммы квадратов (суммы модулей) остаточных отклонений [239]. Такой подход возможен лишь при наличии достаточно полной ап-

приорной информации о виде функциональной зависимости измеряемых величин. Если он заранее неизвестен и класс возможных моделей достаточно широк, как в случае проведения совместных измерений, то применение упомянутых критериев оказывается мало эффективным. Такой подход не позволяет также учесть совокупно исходные данные различного уровня формализации (количественные и качественные факторы, объективные и субъективные оценки).

Более общий подход к решению такой задачи, дающий возможность устранить перечисленные недостатки, основан на использовании теории нечетких множеств [213–215].

Рассмотрим задачу выбора модели из множества Ω_f [240, 241]. Можно использовать имеющиеся данные о свойствах гладкости искомой функции, например, предположить, что она с некоторой степенью приближения принадлежит множеству $L_\Phi^{m_0}$ линейных комбинаций m_0 «базисных» функций $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{m_0}$. Подмножество L_Φ^m этого множества состоит из линейных комбинаций $\sum_{i=1}^m a_i \cdot \varphi_i$ базисных функций. Тогда появляется возможность рассматривать другие модели из Ω_f , интерпретируя их как альтернативы $f_i (f_i \in \Omega_f)$, а множества L_Φ^m ($m = 1, 2, \dots, m_0$) — как признаки, по которым они сравниваются.

Сравнивать альтернативы можно различными способами, например, задавая отношение предпочтения, устанавливая степень допустимости альтернатив и т. д. Рассмотрим один из вариантов, когда нечеткие отношения предпочтения задаются функциями полезности $U_j(f_i)$. Значения $U_j(f_i)$ дают в этом случае числовую оценку альтернативы f_i по признаку j ($j = 1, 2, \dots, n_0$). Каждая из функций полезности описывает отношение предпочтения на Ω_f вида:

$$R_j = \left\{ (f_k, f_i) \mid f_k, f_i \in \Omega_f, u_j(f_k) \geq u_j(f_i) \right\} \quad (2.42)$$

Выбор u_j зависит от измерительной задачи, т. е. от набора рассматриваемых признаков. Если признаки неравнозначны, то вводятся степени важности λ_j ($0 \leq \lambda_j \leq 1$) каждого отношения R_j . Выражения для λ_j также зависят от измерительной задачи и их можно определить на основе объективных или субъективных оценок (экспертным путем).

Задача заключается в выборе альтернативы (модели), имеющей, по возможности, максимальные оценки по всем признакам. Следует отметить, что предъявляемые к альтернативам требования, в общем случае, противоречивы (в силу нечеткости исходных данных о виде модели), и идеального решения не существует.

Для построения эффективных моделей применим схему, основанную на использовании теории нечетких множеств. Образует множество

$\mathcal{Q}_1 = \bigcap_{j=1}^{n_0} R_j$ с функцией принадлежности:

$$\mu_{\mathcal{Q}_1}(f_k, f_i) = \min\{\mu_1(f_k, f_i), \dots, \mu_{n_0}(f_k, f_i)\}, \quad (2.43)$$

где, например:

$$\mu_j(f_k, f_i) = \begin{cases} 1, & (f_k, f_i) \in R_j, \\ 0, & (f_k, f_i) \notin R_j. \end{cases}$$

Подмножество эффективных альтернатив в множестве $(\Omega_f, \mu_{\mathcal{Q}_1})$ определяется функцией принадлежности

$$\mu_{\mathcal{Q}_1}^{\text{эф}}(f_k) = 1 - \sup_{f_i \in \Omega_f} [\mu_{\mathcal{Q}_1}(f_i, f_k) - \mu_{\mathcal{Q}_1}(f_k, f_i)]. \quad (2.44)$$

Образует теперь множество другого вида: $\mathcal{Q}_2 = \bigcup_{j=1}^{n_0} \lambda_j \cdot R_j$ позволяющее учесть различие в степени важности исходных отношений, с функцией принадлежности

$$\mu_{\mathcal{Q}_2}(f_k, f_i) = \sum_{j=1}^{n_0} \lambda_j \mu_j(f_k, f_i). \quad (2.45)$$

Подмножество эффективных альтернатив в множестве определяется так же, как и выше, функцией принадлежности

$$\mu_{\mathcal{Q}_2}^{\text{эф}}(f_k) = 1 - \sup_{f_i \in \Omega_f} [\mu_{\mathcal{Q}_2}(f_i, f_k) - \mu_{\mathcal{Q}_2}(f_k, f_i)]. \quad (2.46)$$

Рациональным будет выбор альтернатив (моделей) из множества

$$\Omega_f^{\text{эф}} = \left\{ f'_k \mid f'_k \in \Omega_f, \mu^{\text{эф}}(f'_k) = \sup_{f_k \in \Omega_f} \mu^{\text{эф}}(f_k) \right\}. \quad (2.47)$$

Необходимо отметить, что величину $\mu^{\text{эф}}(f'_k)$ можно интерпретировать, как критерий качества модели, определенный на множестве Ω_f .

В качестве примера допустим, что имеются три класса моделей для описания массива экспериментальных данных:

- полиномы, имеющие вид разложения в ряд Тейлора в окрестности некоторого фиксированного значения аргумента — f_1 ;
- ортогональные полиномы, построенные по совокупности экспериментальных данных — f_2 ;
- приближенная модель, построенная на основе априорных (теоретических) представлений о рассматриваемой зависимости — f_3 .

Сформулируем набор интересующих признаков:

- 1) близость модели к совокупности экспериментальных данных;
- 2) близость модели к искомой функциональной зависимости;
- 3) план эксперимента;
- 4) значение среднего квадратического отклонения параметров модели;
- 5) число параметров модели (при необходимости этот перечень может быть расширен).

Для дальнейшей формализации исходных данных необходимо выбрать количественную меру каждого признака (можно применять при этом и субъективные оценки). Для перечисленных признаков можно использовать соответственно:

- 1) оценку дисперсии (S_0^2);
- 2) непараметрические статистики (коэффициенты согласия Кендалла, коэффициент Уилкоксона);
- 3) определитель информационной матрицы $\det M$ (для D -оптимальных планов);
- 4) максимальное относительное значение среднего квадратического отклонения параметров модели ($\max S_{a_k} / a_k$);
- 5) число параметров модели данного вида (K).

Задаваясь отношениями предпочтения из (2.42) в виде:

S_0^2	f_1	f_2	f_3
f_1	1	0	0
f_2	1	1	1
f_3	1	0	1

K	f_1	f_2	f_3
f_1	1	1	0
f_2	0	1	0
f_3	1	1	1

(2.48)

и образуя из них отношения Q_1 и Q_2 , находим μ_{Q_1} и μ_{Q_2} по (2.43) и (2.45) соответственно в форме, аналогичной (2.48), затем множество недоминируемых альтернатив $\mu_{Q_1}^{\text{эф}}$ и $\mu_{Q_2}^{\text{эф}}$ по (2.44) и (2.46) соответственно в форме

$$\mu_{Q_2}^{\text{эф}}(f_i) = \frac{f_1 \ f_2 \ f_3}{0 \ 1 \ 1} \quad (2.49)$$

и на их основе получаем множество (2.47) эффективных альтернатив $\Omega_f^{эф}$ в виде, аналогичном (2.49), из которого выбираем модель f_i с максимальным значением функции принадлежности.

Такой подход обеспечивает возможность, кроме совместного учета объективных и субъективных (качественных) признаков и неполноты исходной информации о сравниваемых моделях, выявить «неинформативные» данные (когда исключение соответствующих матриц предпочтения не оказывает влияния на результат). Кроме того, этот подход можно модифицировать для нормирования функциональных зависимостей типа, например, амплитудной характеристики измерительного канала.

Для решения проблемы метрологического обеспечения аналоговой аппаратуры точной магнитной записи, предполагающей организацию метрологической аттестации и поверки АМЗ, кроме выявления комплекса нормированных метрологических характеристик, частных составляющих погрешности и создания методики расчета результирующей погрешности регистрации (преобразования) по ее частным составляющим, необходимо разработать методы и средства измерений, позволяющие экспериментально оценить метрологические характеристики АМЗ и являющиеся технической основой для проведения ее аттестации и поверки. При этом основное внимание целесообразно уделить тем характеристикам, параметры которых не удастся определить существующими традиционными измерительными приборами, а именно: погрешность регистрации, динамические характеристики и изменения (колебания) времени запаздывания сигнала в канале АМЗ. Особенно остро стоит вопрос создания измерителей погрешности магнитной регистрации, поскольку эта задача не была решена в мировой практике.

2.3. Методы оценки основной погрешности регистрации сигналов измерительной информации в каналах аппаратуры точной магнитной записи

Одним из основных параметров аппаратуры точной магнитной записи, используемой в качестве блока измерительной информационной системы или измерительно-вычислительного комплекса и представляющей собой, с метрологической точки зрения, измерительный преобразователь [152], являются характеристики основной и дополнительной погрешности в соответствии с [75].

Процесс измерения искажений сигнала, прошедшего через традиционный стационарный четырехполюсник, не представляет принципиальных затруднений при заданном виде сигнала [81, 88] и заключается в по-

лучении текущей (мгновенной) разности сигнала, прошедшего через четырехполюсник, и испытательного (образцового) сигнала, задержанного во времени и отмасштабированного в соответствии с номинальными коэффициентом передачи и временем запаздывания исследуемого четырехполюсника.

Попытки использования этого метода для оценки погрешности магнитной регистрации аналоговых сигналов измерительной информации аппаратурой точной магнитной записи кончаются неудачей, поскольку получаемые значения приведенной погрешности изменяются во времени в пределах от + 200 % до – 200 %. Это обусловлено колебаниями времени запаздывания сигнала в канале АМЗ, вызванными несовершенством ее лентопротяжного механизма, приводящим к деформации временного масштаба воспроизведенного сигнала. Кроме того, необходимо иметь в виду, что момент записи и момент воспроизведения сигналов в АМЗ могут быть разнесены во времени на неопределенный и зачастую весьма большой интервал, что дополнительно затрудняет получение разности искаженного воспроизведенного и образцового сигнала, так как последний к моменту воспроизведения может и не существовать (отсутствовать) и его необходимо воссоздавать (восстанавливать).

К этому необходимо добавить, что реальные сигналы, регистрируемые аппаратурой точной магнитной записи, обычно имеют сложную форму и богатый спектральный состав и могут рассматриваться как реализации случайного процесса. Нетрудно показать, что уровень искажений сложных сигналов будет больше, чем сигналов простой формы, например — напряжения постоянного тока или гармонического колебания заданной амплитуды и частоты. Для более адекватной оценки погрешности магнитной регистрации целесообразно выбирать испытательный сигнал сложной формы, по своим параметрам приближающийся к реальным регистрируемым сигналам. Но выбор испытательного сигнала нерегулярной сложной формы добавляет трудности его воссоздания при воспроизведении и синхронизации с сигналом, воспроизведенным с исследуемого канала АМЗ.

Эти трудности удалось преодолеть при использовании в качестве испытательного сигнала псевдослучайных двоичных последовательностей, в частности, М-последовательностей (кодов Хаффмена) [226, 242–250]. На основе предложенных методов были разработаны средства измерений, позволяющие осуществить метрологическую аттестацию и поверку каналов АМЗ и названные измерителями погрешности магнитной регистрации (ИПМР). Их классификация с учетом многообразия эксплуатируемой на практике АМЗ приведена на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Классификация измерителей погрешности магнитной регистрации

Сущность используемого метода измерения погрешности магнитной регистрации заключается в воссоздании при воспроизведении того испытательного (образцового) сигнала, который использовался при записи, синхронизации его с сигналом, воспроизводимым с исследуемого канала АМЗ, регулировании амплитуды (масштабировании) воссозданного сигнала в соответствии с номинальным коэффициентом передачи канала, вычитании из воспроизведенного сигнала и измерении полученной разности (или ее обработки по заданному алгоритму). Эти операции удается технически осуществить в том случае, когда испытательный сигнал может быть сформирован средствами дискретной техники, имеет регулярную структуру (т. е. является периодическим) и какую-либо особенность в течение периода, позволяющую реализовать синхронизацию. Один из вариантов осуществления предложенного метода поясняется **функциональной схемой ИПМР** [242, 243], приведенной на рис. 2.5.

С генератора опорного сигнала ГОС 1 импульсы тактовой частоты поступают на вход генератора испытательного сигнала ГИС 2 и через блок регулируемой задержки БРЗ 5 — на вход аналогичного генератора ГИС 9. Генератор испытательного сигнала ГИС 2 (ГИС 9) построен на 60

основе счетчикового делителя со взвешенным суммированием напряжений со всех его выходов с весовыми коэффициентами 2^{-n+i} , где i — номер триггера в счетчиковом делителе, содержащем n триггеров. Напряжение на выходе ГИС по форме напоминает пилообразное напряжение [225, с. 199] с резким перепадом один раз за период. Псевдослучайный испытательный сигнал с выхода ГИС 2 через регулятор напряжения РН 3 и фильтр нижних частот ФНЧ 4 подается на вход исследуемого канала АМЗ 8 для записи. Частота среза ФНЧ 4 (ФНЧ 13), как и тактовая частота импульсов ГОС 1, выбирается равной верхней граничной частоте полосы пропускания канала АМЗ 8 для того, чтобы спектр испытательного сигнала не превосходил по ширине полосы пропускания канала.

Воспроизведенный сигнал с выхода канала АМЗ 8 поступает на один из входов блока вычитания БВ 11, на другой вход которого подается воссозданный генератором ГИС 9 испытательный сигнал, пропущенный предварительно через регулятор напряжения РН 12 (для его правильного масштабирования) и фильтр нижних частот ФНЧ 13. Уровень разностного напряжения с выхода блока вычитания БВ 11 измеряется вольтметром В 14.

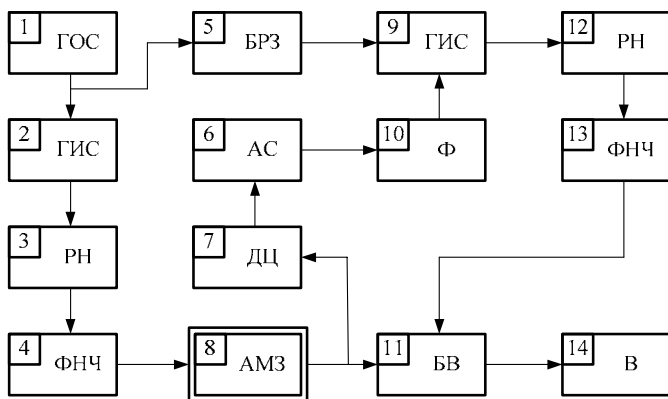


Рис. 2.5. Функциональная схема измерителя погрешности магнитной регистрации одноканальной АМЗ без компенсации погрешности от колебаний времени запаздывания

ГОС 1 — генератор опорного сигнала; ГИС 2 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала; РН 3, РН 12 — регулятор напряжения; ФНЧ 4, ФНЧ 13 — фильтр нижних частот; БРЗ 5 — блок регулируемой задержки; АС 6 — амплитудный селектор; ДЦ 7 — дифференцирующая цепь; АМЗ 8 — исследуемый канал аппаратуры точной магнитной записи; Ф 10 — формователь; БВ 11 — блок вычитания; В 14 — вольтметр

Кроме того, воспроизведенный сигнал с выхода АМЗ 8, подается через дифференцирующую цепь ДЦ 7, амплитудный селектор АС 6 и формирователь Ф 10 на установочные входы счетчикового делителя ГИС 9, осуществляя грубую синхронизацию выходного сигнала этого генератора с воспроизведенным. Дифференцирующая цепь ДЦ 7, амплитудный селектор АС 6 и формирователь Ф 10 выделяют момент резкого изменения воспроизведенного сигнала один раз за период и устанавливают коротким импульсом счетчиковый делитель генератора ГИС 9 в нужное состояние. Точная синхронизация производится регулировкой времени задержки в БРЗ 5 по минимуму показаний вольтметра В 14. Если коэффициент передачи исследуемого канала АМЗ 8 равен единице, то регулятор напряжения РН 12 может отсутствовать.

Амплитуду испытательного сигнала на входе АМЗ 8 выбирают с помощью регулятора напряжения РН 3 равной номинальному уровню входного сигнала АМЗ. Благодаря этому, а также выбору частоты среза ФНЧ 4, равной верхней граничной частоте полосы пропускания исследуемого канала, напряжение на выходе блока вычитания БВ 11, пропорциональное погрешности, включает в себя составляющие, обусловленные инерционными свойствами канала, нелинейностью его амплитудной характеристики, уровнем помех различного происхождения и колебаниями времени запаздывания сигнала.

Недостатком такого исполнения ИПМР является заметная неравномерность линейчатого спектра испытательного сигнала как по амплитуде дискретных его составляющих, так и по шкале частот.

Кроме того, в нем есть необходимость ручной регулировки синхронизации.

Для устранения этих недостатков предложен и реализован **измеритель погрешности магнитной регистрации** [245], позволяющий **автоматизировать** процесс синхронизации и обеспечить поверку АМЗ как с **одновременным**, так и с **разновременными режимами записи и воспроизведения**. Функциональная схема ИПМР приведена на рис. 2.6, а принцип его действия заключается в следующем.

С генератора опорного сигнала ГОС 1 напряжение прямоугольной формы с частотой f_0 поступает на вход счетчиковых делителей СД 2 и СД 4. Эти делители представляют собой пересчетные схемы на триггерах с выбранным коэффициентом пересчета K . Напряжение прямоугольной формы с выходов делителей СД 2 и СД 4 с частотой f_0/K поступает в цепи сдвига регистров генераторов испытательного сигнала ГИС 3 и ГИС 7 соответственно. В качестве испытательного сигнала выбрана псевдослучайная двоичная последовательность максимальной длины (М-последовательность). Частоту импульсов сдвига целесообразно выбирать равной

удвоенной верхней граничной частоте полосы пропускания исследуемого канала АМЗ 9. Дальнейшее увеличение частоты импульсов сдвига, хотя и улучшает качество спектрального состава испытательного сигнала в полосе пропускания канала АМЗ 9 при том же периоде сигнала (спектр более приближается к сплошному, равномерно распределенному в полосе частот канала АМЗ 9), но в силу искажения испытательного сигнала фильтром нижних частот ФНЧ 6 и каналом АМЗ 9 затрудняет восстановление его формы формирователем Ф 8 и, следовательно, работу временного селектора ВС 5, обеспечивающего раз за период синхронизацию сигналов на входах блока вычитания БВ 12.

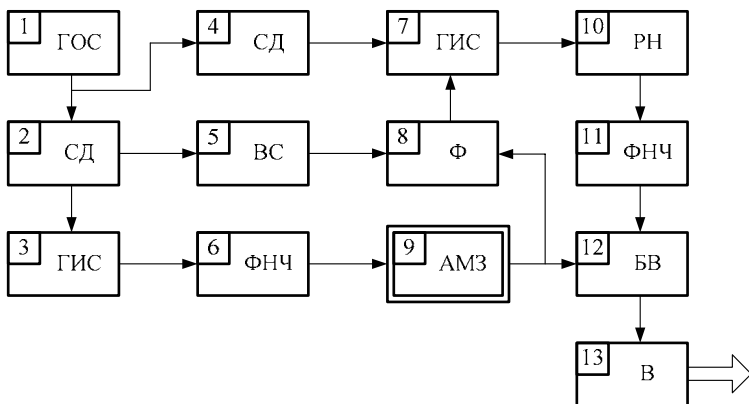


Рис. 2.6. Функциональная схема измерителя погрешности магнитной регистрации одноканальной АМЗ с одновременным и разновременным режимами записи–воспроизведения
 ГОС 1 — генератор опорного сигнала; СД 2, СД 4 — счетчиковый делитель;
 ГИС 3, ГИС 7 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала;
 ВС 5 — временной селектор; ФНЧ 6, ФНЧ 11 — фильтр нижних частот;
 Ф 8 — формирователь; АМЗ 9 — исследуемый канал аппаратуры точной магнитной записи; РН 10 — регулятор напряжения;
 БВ 12 — блок вычитания; В 13 — вольтметр

С выхода генератора ГИС 3 испытательный сигнал подается на фильтр нижних частот ФНЧ 6, который подавляет гармоники, выходящие за полосу пропускания канала АМЗ 9. В режиме воспроизведения сигнал с выхода канала АМЗ 9, претерпевший искажения при записи, хранении и считывании, поступает на один из входов блока вычитания БВ 12. Напряжение на выходе формирователя Ф 8 представляет собой последовательность прямоугольных импульсов различной длительности и с раз-

личными по длительности интервалами (паузами) между ними. Один раз за период испытательного сигнала на выходе формирователя Ф 8 будет присутствовать импульс самой большой длительности, равной периоду импульсов сдвига, умноженному на число разрядов регистра сдвига ГИС 3. Эта особенность выбранного испытательного сигнала используется при построении временного селектора ВС 5, который предназначен для автоматической синхронизации (раз за период испытательного сигнала) сигналов на входах блока вычитания БВ 12. Синхронизация осуществляется путем установки триггеров счетчикового делителя СД 4 и генератора ГИС 7 в состояние, при котором сигналы на входах блока вычитания БВ 12 оказываются синхронными. Установка производится коротким импульсом, поступающим с выхода временного селектора ВС 5 один раз за период испытательного сигнала по окончании самого длительного импульса на его входе, подключенном к выходу формирователя Ф 8. Временной селектор ВС 5 строится на базе счетчика импульсов с промежуточного выхода СД 2. Счет ведется только во время прохождения импульса с формирователя Ф 8, а паузой сбрасывается в нуль. Логической схемой «И», входящей в состав ВС 5, выделяется то состояние счетчика импульсов, которое характерно только для прохождения самого длительного импульса. По заданному фронту импульса на выходе схемы «И» формируется короткий импульс установки выбранных состояний СД 4 и ГИС 7. Паразитные временные сдвиги в блоках ВС 5, ГИС 7, РН 10, ФНЧ 11 устраняются соответствующим выбором уровня срабатывания формирователя Ф 8. Разрешающая способность временного селектора ВС 5 выбирается таким образом, чтобы устойчиво различать самый длительный импульс от наиболее близких к нему по длительности с учетом допустимых колебаний скорости сигналоносителя.

Воссозданный испытательный псевдослучайный сигнал с выхода ГИС 7, по форме идентичный сигналу с ГИС 3 и синхронизированный с выходным сигналом канала АМЗ 9, поступает на регулятор напряжения РН 10, который обеспечивает равенство амплитудных масштабов воспроизведенного и воссозданного (образцового) сигнала, для чего его коэффициент передачи выставляется равным номинальному (паспортному) коэффициенту передачи канала АМЗ 9. С выхода РН 10 сигнал подается через фильтр нижних частот ФНЧ 11, функции и параметры которого идентичны ФНЧ 6, на другой вход блока вычитания БВ 12. Выходной сигнал БВ 12, равный мгновенной разности воспроизведенного и воссозданного сигналов, т. е. напряжение, пропорциональное абсолютной погрешности магнитной регистрации, поступает на вход вольтметра В 13. В качестве В 13 может быть использован (в зависимости от поставленной

задачи: какую характеристику погрешности необходимо оценить) вольтметр средних, действующих или пиковых значений. Кроме того, вместо вольтметра В 13 могут быть использованы различного рода анализаторы: дисперсиометры, коррелометры, спектроанализаторы, измерители плотности закона распределения вероятностей и т. п.

В рассмотренных выше ИПМР оценивается погрешность АМЗ, включающая, по крайней мере в течение периода испытательного сигнала, составляющую, обусловленную дрейфом и колебаниями скорости магнитного носителя, т. е. колебаниями времени запаздывания сигнала при записи–воспроизведении. Для того, чтобы исключить эту составляющую, необходимо использовать дополнительный канал АМЗ для регистрации «пилот-сигнала» или закладывать в испытательный сигнал информацию о временном масштабе при записи.

На рис. 2.7 приведена функциональная схема ИПМР для многоканальной АМЗ [247].

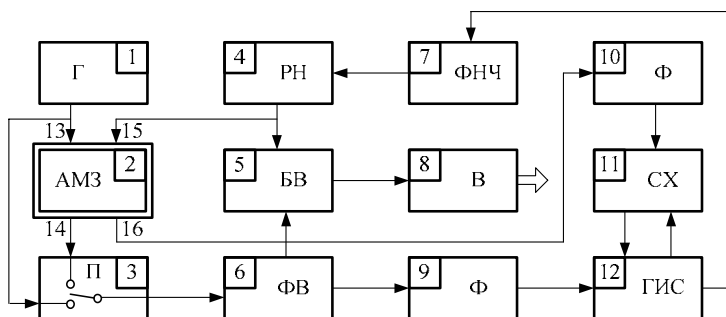


Рис. 2.7. Функциональная схема измерителя погрешности магнитной регистрации многоканальной АМЗ;

Г 1 — генератор синусоидального сигнала; АМЗ 2 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи; П 3 — переключатель; РН 4 — регулятор напряжения; БВ 5 — блок вычитания; ФВ 6 — фазовращатель; ФНЧ 7 — фильтр нижних частот; В 8 — вольтметр; Ф 9, Ф 10 — формирователь; СХ 11 — синхронизатор; ГИС 12 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала

Принцип его действия состоит в следующем. В режиме записи переключатель П 3 находится в нижнем положении и подключает «пилот - сигнал» с выхода генератора синусоидального напряжения Г 1 через фазовращатель ФВ 6 и формирователь Ф 9 к цепи сдвига регистра генератора испытательного псевдослучайного сигнала (М-последовательности) ГИС 12. Кроме того, это гармоническое напряжение записывается по

вспомогательному каналу АМЗ 2 (вход 13). Регулировка фазовращателя ФВ 6 предусматривается только в режиме воспроизведения. Псевдослучайный испытательный (образцовый) сигнал с выхода ГИС 12, пройдя через фильтр нижних частот ФНЧ 7 и регулятор напряжения РН 4, записывается по исследуемому каналу аппаратуры точной магнитной записи АМЗ 2 (вход 15). Частота среза ФНЧ 7 выбирается равной верхней граничной частоте полосы пропускания исследуемого канала АМЗ 2 и согласует, тем самым, ширину спектра испытательного сигнала с полосой пропускания канала. Регулятор напряжения РН 4 позволяет выставить амплитуду испытательного сигнала равной верхней границе амплитудного диапазона исследуемого канала.

В режиме воспроизведения переключатель П 3 находится в верхнем положении и подключает считанный с выхода вспомогательного канала АМЗ 2 (выход 14) «пилот-сигнал» через фазовращатель ФВ 6 и формирователь Ф 9 ко входу цепи сдвига ГИС 12. Генератор ГИС 12 воссоздает существовавший при записи испытательный сигнал, который через фильтр нижних частот ФНЧ 7 и регулятор напряжения РН 4 подается на один из входов блока вычитания БВ 5. На другой вход БВ 5 поступает искаженный сигнал с выхода 16 исследуемого канала АМЗ 2. Уровень напряжения, полученного, как разность искаженного и воссозданного сигналов, измеряется вольтметром В 8 или поступает на обработку по заданному алгоритму. Для «грубой» синхронизации искаженного и воссозданного сигналов используется формирователь Ф 10 и синхронизатор СХ 11, осуществляющий выделение самого длинного импульса один раз за период М-последовательности и выставляющий ГИС 12 в соответствующее состояние. «Точная» синхронизация производится с учетом колебаний времени запаздывания сигнала в исследуемом канале АМЗ 2 внутри периода испытательного сигнала с помощью «пилот-сигнала», воспроизводимого со вспомогательного канала АМЗ 2 (выход 14). Влияние разности времени запаздывания сигналов в двух каналах АМЗ 2 и блоках ИПМР устраняется фазовращателем ФВ 6. Использование «грубой» и «точной» синхронизации позволяет скомпенсировать как высокочастотные, так и низкочастотные составляющие колебаний времени запаздывания сигнала в канале, обусловленные как детонацией, так и скольжением (дрейфом) скорости сигналоносителя. Применение как в режиме записи, так и в режиме воспроизведения одних и тех же блоков ИПМР: фазовращателя ФВ 6, формирователя Ф 9, генератора ГИС 12, фильтра нижних частот ФНЧ 7 и регулятора напряжения РН 4, позволяет исключить методическую погрешность измерений, обусловленную их неидентичностью.

Недостатком описанного выше ИПМР является наличие погрешности результата измерений, вносимой динамическим перекосом сигналоносителя относительно многодорожечной магнитной головки, который приводит к тому, что колебания времени запаздывания в исследуемом и вспомогательном канале аппаратуры точной магнитной записи не совпадают между собой.

Для устранения этого недостатка был предложен **измеритель погрешности магнитной регистрации с компенсацией погрешности от колебаний времени запаздывания** сигнала в одноканальной АМЗ с разновременными режимами записи и воспроизведения [250], функциональная схема которого приведена на рис. 2.8.

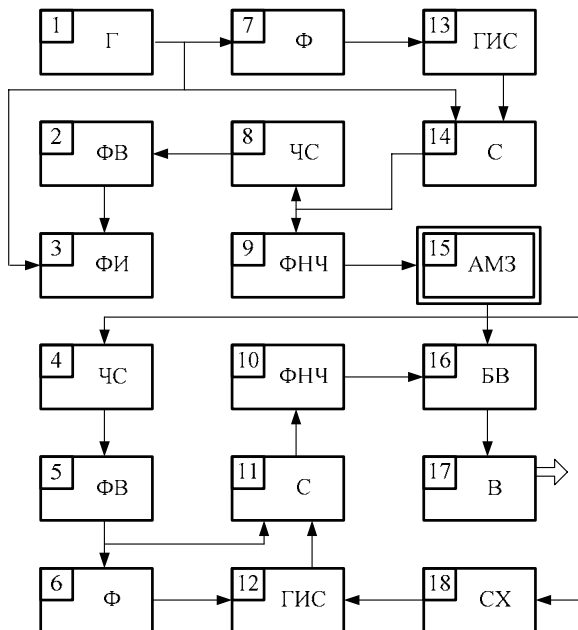


Рис. 2.8. Функциональная схема измерителя погрешности магнитной регистрации с компенсацией погрешности от колебаний времени запаздывания сигнала в канале АМЗ

- Г 1 — генератор синусоидального сигнала; ФВ 2, ФВ 5 — фазовращатель;
 ФИ 3 — фазоизмеритель; ЧС 4, ЧС 8 — частотный селектор;
 Ф 6, Ф 7 — формирователь; ФНЧ 9, ФНЧ 10 — фильтр нижних частот;
 С 11, С 14 — сумматор; ГИС 12, ГИС 13 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала; АМЗ 15 — исследуемый канал аппаратуры точной магнитной записи; БВ 16 — блок вычитания; В 17 — вольтметр;
 СХ 18 — синхронизатор

Принцип его действия состоит в следующем. В режиме юстировки и записи опорное гармоническое напряжение с выхода генератора Г 1 поступает через формирователь Ф 7 на вход цепи сдвига генератора испытательного псевдослучайного сигнала (М-последовательности) ГИС 13. Частота опорного напряжения Г 1 выбирается равной верхней граничной частоте полосы пропускания исследуемого канала АМЗ 15 и попадает в точку частотного спектра псевдослучайного сигнала, в которой составляющая его дискретного (линейчатого) спектра равна нулю. Это гармоническое напряжение складывается с испытательным сигналом на линейном сумматоре С 14 и, пройдя через фильтр нижних частот ФНЧ 9 с частотой среза, равной верхней граничной частоте полосы пропускания исследуемого канала, поступает на вход АМЗ 15. Из суммарного сигнала на выходе С 14 выделяется частотным селектором ЧС 8 гармоническое напряжение опорной частоты. Выделенное напряжение будет сдвинуто по фазе относительно опорного вследствие временных задержек, возникающих при выполнении операций суммирования и выделения. Поэтому выделенное напряжение делают синфазным с опорным, т. е. с помощью фазовращателя ФВ 2 и фазометра ФИ 3 добиваются нулевой разности фаз между ними. После выполнения операции фазирования осуществляют запись суммарного сигнала по исследуемому каналу АМЗ 15.

В режиме воспроизведения используют те же блоки генератора испытательного псевдослучайного сигнала ГИС, сумматора С, частотного селектора ЧС и фазовращателя ФВ, что и в режиме записи, при этом органы регулировки фазовращателя после юстировки остаются в неизменном положении. Из воспроизведенного с исследуемого канала АМЗ 15 сигнала частотным селектором ЧС 4 выделяется гармоническое напряжение опорной частоты, которое после прохождения через фазовращатель ФВ 5 суммируется на С 11 с полученным из него же (с помощью формирователя Ф 6 и генератора ГИС 12) псевдослучайным воссозданным сигналом. Из этого суммарного контрольного сигнала, прошедшего через фильтр нижних частот ФНЧ 10, вычитается в БВ 16 искаженный сигнал с выхода исследуемого канала АМЗ 15. Уровень разностного напряжения на выходе блока вычитания БВ 16 измеряется вольтметром В 17. «Грубая» синхронизация суммарного контрольного сигнала с воспроизведенным, т. е. синхронизация по низкочастотной составляющей, осуществляется один раз за период испытательного сигнала, производится синхронизатором СХ 18, представляющим собой временной селектор, выделяющий самый длинный импульс. «Точная» синхронизация, т. е. синхронизация по высокочастотной составляющей, происходит автоматически. Это обеспечивается тем, что временной масштаб воссозданного (контрольно-

го) сигнала изменяется в соответствии с колебаниями времени запаздывания сигнала именно в исследуемом канале АМЗ 15, поскольку сфазированное опорное гармоническое напряжение (в сумме с испытательным псевдослучайным сигналом) записывалось по исследуемому каналу.

Таким образом, предложено два метода экспериментального оценивания погрешности магнитной регистрации аналоговых сигналов измерительной информации:

- метод, учитывающий составляющую погрешности, обусловленную колебаниями времени запаздывания сигнала в канале АМЗ [242–245];

- метод оценки погрешности с компенсацией составляющей от колебаний времени запаздывания [246–248].

Предложенные технические решения выполнены на уровне изобретений и три из них [242, 245, 247] внедрены в метрологическую практику.

Интересно отметить, что идеи, заложенные в упомянутых изобретениях, параллельно и, по-видимому, независимо были развиты специалистами НАСА в Соединенных Штатах Америки. В патенте США № 4003084 [251], зарегистрированном 25.03.75 г. и опубликованном 11.01.77 г., посвященном методу и средствам испытаний систем с магнитной записью–воспроизведением, по-существу повторяется техническое решение, предложенное нами в [242] с приоритетом от 29.03.73 г. и опубликованное 05.06.75 г.

2.4. Методы определения динамических характеристик каналов аппаратуры точной магнитной записи

Канал аналоговой аппаратуры точной магнитной записи–воспроизведения электрических сигналов измерительной информации можно рассматривать как конечномерную линейную систему, динамические свойства которой можно охарактеризовать как «внешними» (вход–выходными), так и «внутренними» математическими описаниями.

К «внешним» математическим описаниям относятся такие эквивалентные друг другу по полноте динамические характеристики, как импульсная весовая функция $q(\tau)$, передаточная функция $Q(p)$ и дифференциальное уравнение. К «внутренним» относится описание в пространстве состояний системы, являющееся более подробным, чем вход–выходные описания, так как несет в себе информацию о структуре системы.

Классическими задачами анализа линейных систем являются идентификация, моделирование и «редукция» модели. Для метрологического анализа конечным результатом является оценка динамической погрешности системы.

Традиционным подходом к определению динамических характеристик каналов аппаратуры точной магнитной записи являлась оценка «неоминимальности» компонент передаточной функции каждого канала, т. е. неравномерности амплитудно-частотной и нелинейности фазо-частотной характеристик в рабочей полосе частот канала.

Однако экспериментальное определение ФЧХ каналов АМЗ связано с преодолением существенных технических трудностей [113]. Поэтому в [252] был предложен альтернативный метод, который дает возможность оценить динамическую погрешность канала по результатам экспериментального определения его импульсной весовой функции.

2.4.1 Методы определения импульсной весовой функции каналов аппаратуры точной магнитной записи

Уравнение измерения значений импульсной весовой функции основано на использовании уравнения Винера-Хопфа, связывающего взаимно-корреляционную функцию $R_{xy}(\tau)$ входного и выходного сигналов канала с импульсной весовой функцией:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(t) \cdot q(t - \tau) dt, \quad (2.50)$$

которое превращается в равенство

$$R_{xy}(\tau) = m \cdot q(\tau) \quad (2.51)$$

(здесь m — коэффициент пропорциональности) в случае, если автокорреляционная функция входного сигнала $x(t)$ может быть достаточно точно аппроксимирована δ -функцией Дирака.

Удобным испытательным сигналом, удовлетворяющим этому требованию, является псевдослучайная двоичная последовательность максимальной длины (так называемая М-последовательность), генерируемая регистром сдвига, охваченным обратной связью по модулю два [225]. Такой сигнал представляет собой двухуровневое напряжение с автокорреляционной функцией (рис. 2.9)

$$R_{xx}(t) = \begin{cases} a^2 \left(1 - \frac{|t|}{\Delta t} \right) & \text{при } |t| \leq \Delta t, \\ -a^2 / (2^n - 1) & \text{при } |t| > \Delta t, \end{cases} \quad (2.52)$$

где a — верхний уровень (амплитуда) сигнала; Δt — период импульсов сдвига; n — число разрядов регистра;

и спектральной плотностью мощности

$$S(\omega) = 2\pi \left(\frac{a}{2^n - 1} \right) \left\{ -(2^n - 1) \cdot \delta \cdot \omega + \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2^n \cdot \left[\frac{\sin \left[\frac{k\pi}{(2^n - 1)} \right]}{\frac{k\pi}{(2^n - 1)}} \right]^2 \cdot \delta \left[\omega - \frac{2\pi k}{(2^n - 1) \cdot \Delta t} \right] \right\} \quad (2.53)$$

с огибающей, пропорциональной $(\sin x/x)^2$.

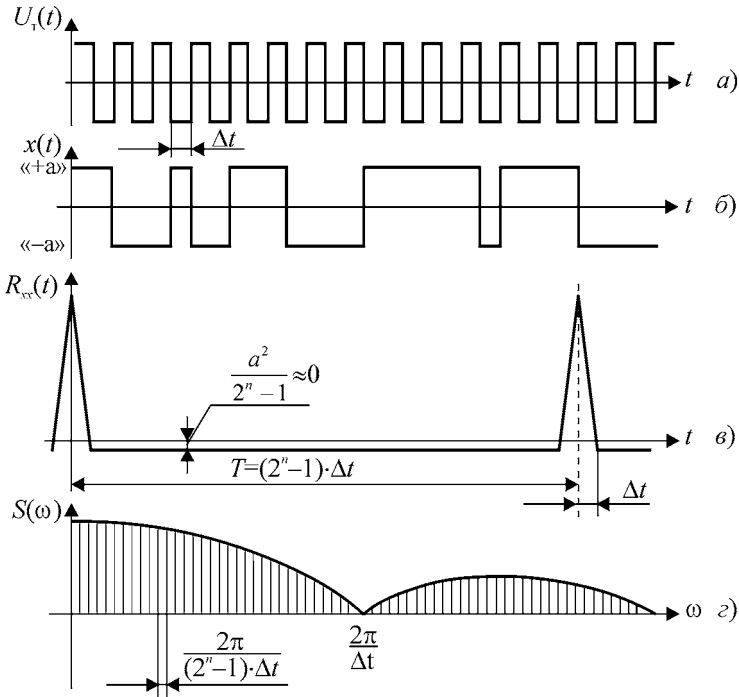


Рис. 2.9. Форма напряжения опорного сигнала тактовой частоты (а), испытательного псевдослучайного сигнала (б), его автокорреляционная функция (в) и спектральная плотность мощности (г)

Такой сигнал отличается хорошей воспроизводимостью формы, так как для стабильности и точности поддержания его статистических параметров необходимо с малой погрешностью выставлять и поддерживать

частоту импульсов сдвига и уровни «нуля» и «единицы», что достаточно просто осуществить технически. Кроме того, при равенстве нижней и верхней границы амплитудного диапазона канала уровням «нуля» и «единицы» этот сигнал обладает максимально допустимой для канала мощностью, а поскольку он генерируется на элементах цифровой техники, то дискретная задержка его во времени достаточно просто осуществляется путем запрета прохождения нужного числа импульсов сдвига. Еще одним достоинством выбранного псевдослучайного двоичного испытательного сигнала является сравнительная простота технической реализации перемножающего устройства коррелометра, которое можно осуществить на простых ключевых схемах.

Для различных модификаций аппаратуры точной магнитной записи и способов ее применения был предложен ряд технических решений, позволяющих создать корреляционные средства измерений для экспериментального определения импульсной весовой функции ее каналов [252–258]. Классификация таких приборов, названных измерителями динамических характеристик (ИДХ), приведена на рис. 2.10.

Сущность используемого метода измерения значений импульсной весовой функции канала АМЗ поясняется функциональными схемами, приведенными на рис. 2.11 — для многоканальной АМЗ, и на рис. 2.12 — для одноканальной аппаратуры магнитной записи.

Принцип действия **измерителя динамических характеристик многоканальной АМЗ** заключается в следующем [252]. Напряжение тактовой частоты с генератора опорного сигнала ГОС 2 записывается по вспомогательному каналу 9 исследуемой АМЗ 3 и служит «пилот-сигналом». В то же время это напряжение тактовой частоты используется в качестве импульсов сдвига для генератора псевдослучайной последовательности ГИС 1. Генерируемая им М-последовательность записывается по исследуемому каналу 8 АМЗ 3. В режиме воспроизведения «пилот-сигнал» с выхода вспомогательного канала 11 поступает на формирователь Ф 5 и через блок регулируемой задержки — в цепь сдвиговых импульсов ГИС 6, который восстанавливает М-последовательность, аналогичную записанной по исследуемому каналу 8 с той лишь разницей, что временной масштаб этой последовательности учитывает колебания времени запаздывания в канале АМЗ 3. На входы коррелометра К 4 подаются два сигнала: один — воспроизведенный с исследуемого канала 10 АМЗ 3, и второй — восстановленный и задержанный — с генератора ГИС 6. На выходе 12 коррелометра К 4 получают значения взаимокорреляционной функции, пропорциональные значениям импульсной весовой функции исследуемого канала 8–10 АМЗ 3.

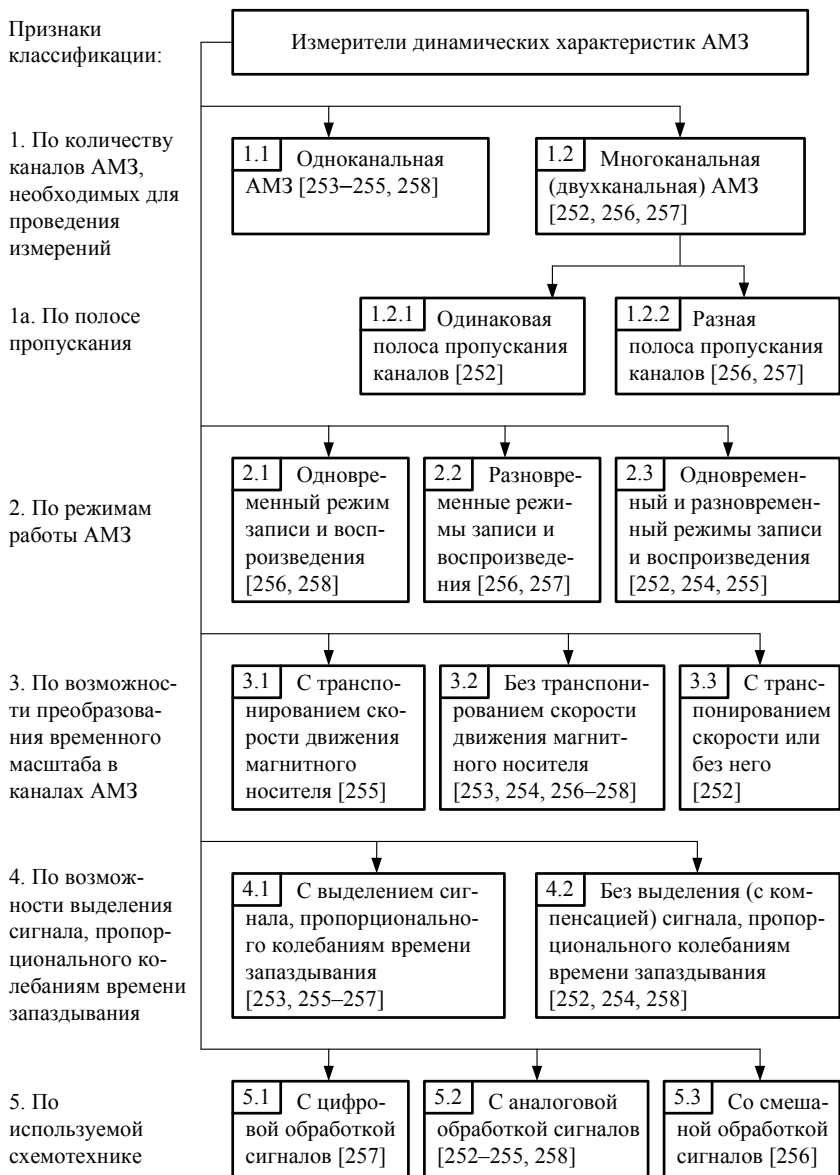


Рис. 2.10. Классификация измерителей динамических характеристик АМЗ

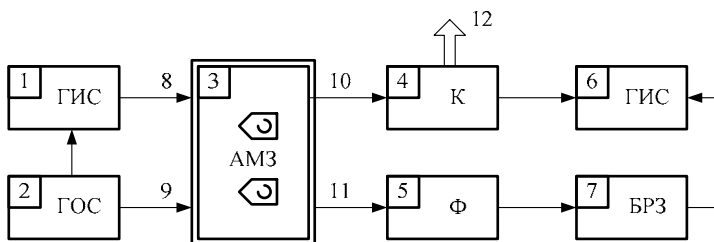


Рис. 2.11. Функциональная схема ИДХ для измерения значений динамических характеристик многоканальной АМЗ:

ГИС 1, ГИС 6 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала;
 ГОС 2 — генератор опорного сигнала тактовой частоты; АМЗ 3 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи; К 4 — коррелометр;
 Ф 5 — формирователь; БРЗ 7 — блок регулируемой задержки

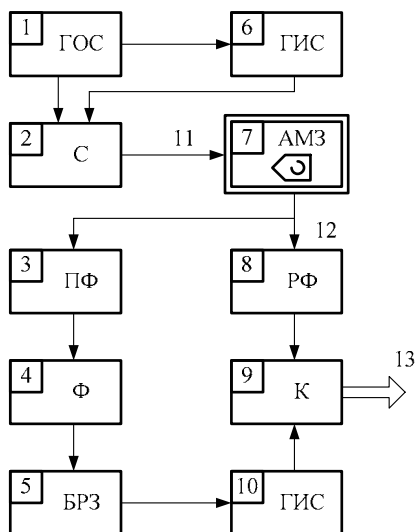


Рис. 2.12. Функциональная схема ИДХ для измерения значений динамической характеристики одноканальной АМЗ:

ГОС 1 — генератор опорного сигнала; С 2 — сумматор; ПФ 3 — полосовой фильтр; Ф 4 — формирователь; БРЗ 5 — блок регулируемой задержки;
 ГИС 6, ГИС 10 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала;
 АМЗ 7 — исследуемый канал аппаратуры точной магнитной записи;
 РФ 8 — режекторный фильтр; К 9 — коррелометр

Особенностью **измерителя динамических характеристик одноканальной АМЗ** [254], функциональная схема которого приведена на рис. 2.12, заключается в том, что сигналы тактовой частоты с ГОС 1 и испытательная М-последовательность с ГИС 6 линейно складываются на сумматоре С 2 и записываются по исследуемому каналу 11 АМЗ 7. При этом используется особенность спектра псевдослучайного сигнала, а именно — равенство нулю составляющей спектральной плотности мощности, соответствующей тактовой частоте $2\pi/\Delta t$ (см. рис. 2.9з). Это дает возможность выделить из сигнала, воспроизведенного с исследуемого канала 12 АМЗ 7, напряжение тактовой частоты полосовым фильтром ПФ 3 и подавить это напряжение в воспроизведенном псевдослучайном сигнале режекторным фильтром РФ 8. Дальнейшая обработка сигналов не отличается от той, которая применена в ИДХ, приведенном на рис. 2.11.

Для многоканальной АМЗ, имеющей каналы с разной полосой пропускания, используется измеритель динамических характеристик, функциональная схема которого приведена на рис. 2.13. Многоканальная АМЗ с разной полосой пропускания каналов достаточно часто встречается на практике, когда в аппаратуре используется канал звукового сопровождения или прямой записи служебной информации, полоса пропускания которого значительно превышает полосу пропускания измерительных каналов, в которых применяется один из модуляционных способов записи сигналов измерительной информации (ЧМ, ЧИМ, ШИМ и др.).

Принцип действия ИДХ, функциональная схема которого приведена на рис. 2.13, заключается в следующем [256]. Импульсная последовательность с генератора опорного сигнала ГОС 3 поступает на вход счетчикового делителя Д 2, который имеет два выхода с разных разрядов. С одного из выходов делителя пилот-сигнал поступает на вспомогательный канал 14 аппаратуры точной магнитной записи АМЗ 4, предназначенный для записи служебной информации или речевого сопровождения, полоса пропускания которого примерно на порядок превышает полосу пропускания каналов записи–воспроизведения сигналов измерительной информации, в частности — канала 13. С другого выхода делителя Д 2 импульсная последовательность поступает на генератор псевдослучайной последовательности ГИС 1 в качестве импульсов сдвига. Испытательный сигнал с выхода ГИС 1 записывается по исследуемому каналу 13 АМЗ 4. При этом частота импульсов сдвига выбирается таким образом, чтобы она была согласована с верхней граничной частотой полосы пропускания канала 13.

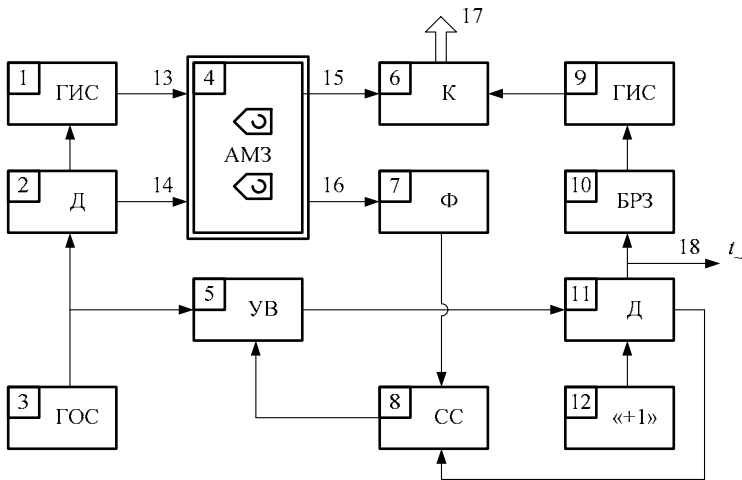


Рис. 2.13. Функциональная схема ИДХ для измерения значений динамических характеристик многоканальной АМЗ с разной полосой пропускания:

- ГИС 1, ГИС 9 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала;
 Д 2, Д 11 — делитель; ГОС 3 — генератор опорного сигнала;
 АМЗ 4 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи;
 УВ 5 — управляемый вентиль; К 6 — коррелометр; Ф 7 — формирователь;
 СС 8 — схема сравнения; БРЗ 10 — блок регулируемой задержки;
 «+1» 12 — блок выработки команды «+1»

В режиме воспроизведения испытательный сигнал, претерпевший искажения, снимается с выхода исследуемого канала 15 АМЗ 4 и подается на первый вход коррелометра К 6, на второй вход которого поступает восстановленный и задержанный образцовый испытательный сигнал в виде псевдослучайной двоичной последовательности с выхода ГИС 9, идентичного по своим параметрам генератору ГИС 1. Для его воссоздания используются блоки Ф 7, СС 8, УВ 5, «+1» 12, Д 11, БРЗ 10 и ГИС 9. Со вспомогательного канала 16 АМЗ 4 воспроизводится «пилот-сигнал», поступающий через формирователь Ф 7 на один из входов схемы сравнения СС 8. На другой вход схемы сравнения СС 8 поступает импульсная последовательность с генератора опорного сигнала ГОС 3, прошедшая через управляемый вентиль УВ 5 и реверсивный счетчиковый делитель Д 11. Схема сравнения СС 8 осуществляет компарирование частот пилот-сигнала, воспроизведенного с АМЗ 4, и образцового «пилот-сигнала», полученного путем деления частоты импульсной последовательности с

ГОС 3. Коэффициенты деления по обоим выходам делителя Д 11 одинаковы с коэффициентами деления по аналогичным выходам делителя Д 2. Частота импульсной последовательности с выхода формирователя Ф 7 изменяется вследствие колебаний скорости носителя при записи и воспроизведении. Частота импульсной последовательности с выхода ГОС 3 является опорной. Если частота последовательности с выхода Ф 7 оказывается выше, чем частота последовательности с выхода Д 11, то схема сравнения СС 8 дает разрешение на вход блока выработки команды «+1» 12, в противном случае схема сравнения дает запрет на прохождение импульсов через управляемый вентиль УВ 5. Таким образом, импульсная последовательность со второго выхода делителя Д 11, поступающая через блок регулируемой задержки БРЗ 10 в цепь импульсов сдвига генератора псевдослучайной последовательности ГИС 9, оказывается синхронизированной с воспроизведенным пилот-сигналом с точностью до одного периода опорного сигнала с ГОС 3 и содержит на выходе 18 делителя Д 11 информацию о колебаниях времени задержки сигнала в канале АМЗ 4.

Следует отметить, что применение такого ИДХ целесообразно при одновременно существующих режимах записи–воспроизведения АМЗ без транспонирования скорости носителя.

Для одноканальной АМЗ с разновременно существующими режимами записи и воспроизведения, т. е. для простейших и наиболее дешевых устройств, рационально использовать измеритель динамических характеристик [253], функциональная схема которого приведена на рис. 2.14.

Принцип его действия заключается в следующем. В режиме записи образцовая псевдослучайная двоичная последовательность, используемая в качестве испытательного сигнала, подается на вход исследуемого канала аппаратуры точной магнитной записи АМЗ 9 и записывается на магнитный носитель.

В режиме воспроизведения выходной сигнал исследуемого канала АМЗ 9 подается на вход 15 коррелометра К 7, на второй вход которого поступает образцовый сигнал с ГИС 4. При равенстве частот воспроизводимого и образцового сигналов и последовательном изменении фазы образцового сигнала с помощью блока регулируемой задержки БРЗ 1 коррелометр К 4 вырабатывает напряжение, пропорциональное значениям импульсной весовой функции исследуемого канала во временных точках, определяемых значением фазового сдвига между воспроизводимым и образцовым сигналами. Для того чтобы исключить влияние изменений частоты воспроизводимого сигнала, обусловленных колебаниями скорости носителя, необходимо обеспечить «привязку» фазы опорного сигнала ГОС 2, управляющего генератором ГИС 4, к фазе воспроизводимого сигнала.

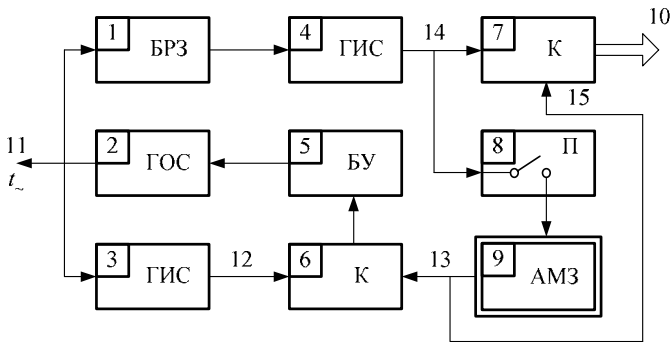


Рис. 2.14. Функциональная схема ИДХ для измерения значений динамической характеристик АМЗ с разновременными режимами записи и воспроизведения:

- БРЗ 1 — блок регулируемой задержки;
- ГОС 2 — управляемый генератор опорного сигнала;
- ГИС 3, ГИС 4 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала;
- БУ 5 — блок управления; К 6, К 7 — коррелометр; П 8 — переключатель;
- АМЗ 9 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи

Для этой цели служит цепь фазовой автоподстройки частоты, образованная генератором ГИС 3, коррелометром К 6 и блоком управления БУ 5. При изменении фазы опорного сигнала относительно фазы воспроизводимого сигнала огибающая выходного напряжения коррелометра К 6 так же, как и коррелометра К 7, повторяет форму импульсной весовой функции исследуемого канала. Выходное напряжение коррелометра К 6 через блок управления БУ 5 воздействует на генератор ГОС 2, изменяя фазу опорного сигнала таким образом, чтобы она «отслеживала» колебания времени запаздывания сигнала в канале АМЗ 9. Благодаря этому, образцовый воссозданный сигнал при воспроизведении оказывается синхронным с воспроизводимым сигналом. Сдвигая образцовый сигнал с помощью блока регулируемой задержки БРЗ 1, можно измерить на выходе 10 коррелометра К 7 все интересующие значения импульсной весовой функции исследуемого канала АМЗ 9. При этом на выходе 11 ГОС 2 в режиме воспроизведения опорный сигнал содержит информацию о колебаниях времени запаздывания сигнала в канале. Следует отметить, что такой измеритель динамических характеристик не приспособлен для работы при транспонировании скорости магнитного носителя АМЗ.

Для измерения значений импульсной переходной функции канала АМЗ с транспонированием скорости магнитного носителя можно использовать ИДХ [255], функциональная схема которого приведена на

рис. 2.15. Принцип его действия заключается в следующем. Образцовый испытательный сигнал в виде псевдослучайной двоичной последовательности с выхода генератора ГИС 5, на вход которого поступают импульсы сдвига с генератора опорного сигнала ГОС 9, записывается по исследуемому каналу АМЗ 1. Воспроизведенный с исследуемого канала АМЗ 1 сигнал поступает параллельно на вход коррелометров К 2, К 3 и К 4. Коррелометр К 2 является основным для измерения значений ИВФ, а коррелометры К 3 и К 4 совместно с генераторами ГОС 11, ГИС 7 и блоком вычитания БВ 8 предназначены для компенсации влияния колебаний времени запаздывания сигнала в исследуемом канале АМЗ 1.

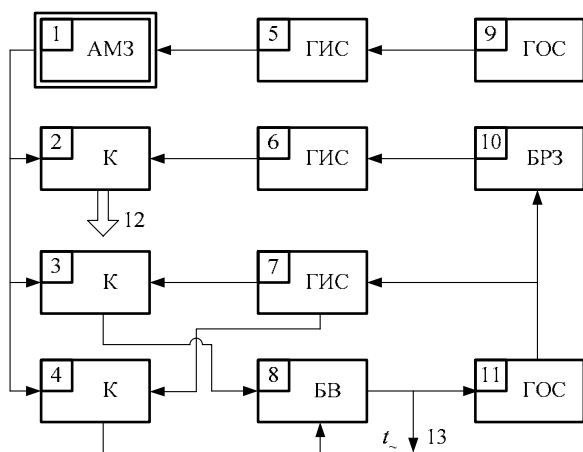


Рис. 2.15. Функциональная схема ИДХ для измерения значений динамической характеристик АМЗ с транспонированием скорости магнитного носителя:

АМЗ 1 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи;
 К 2, К 3, К 4 — коррелометр; ГИС 5, ГИС 6, ГИС 7 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала; БВ 8 — блок вычитания;
 ГОС 9, ГОС 11 — генератор опорного сигнала;
 БРЗ 10 — блок регулируемой задержки

Сигнал с выхода генератора опорного сигнала ГОС 11 через блок регулируемой задержки БРЗ 10 поступает в цепь импульсов сдвига генератора ГИС 6 и с его выхода — на второй вход коррелометра К 2, в котором вычисляются значения взаимокорреляционной функции, пропорциональные значениям импульсной весовой функции исследуемого канала. На вторые входы коррелометров К 3 и К 4 поступает псевдослучайная

последовательность с разных отводов регистра сдвига генератора ГИС 7. При этом сдвиг во времени между этими двумя псевдослучайными последовательностями выбирается так, чтобы выходные напряжения коррелометров К 3 и К 4 равнялись $a^2/2$ (см. рис. 2.9в) и располагались симметрично на середине противоположных склонов первой полуволны импульсной весовой функции исследуемого канала АМЗ 1. При таком выборе сдвига по времени сигналы с выходов коррелометров К 3 и К 4 в блоке вычитания БВ 8 дают напряжение 13, пропорциональное колебаниям времени запаздывания в исследуемом канале, которое поступает на управляющий вход перестраиваемого генератора ГОС 11. Таким образом, частота импульсов сдвига с выхода генератора ГОС 11 «отслеживает» колебания времени запаздывания, тем самым исключая влияние этих колебаний на результаты измерения значений ИВФ коррелометром К 2.

Для обеспечения измерения значений ИВФ в режиме транспонирования скорости магнитного носителя частота импульсов генератора ГОС 11 выбирается в коэффициент транспонирования раз большей (меньшей), чем частота импульсов генератора ГОС 9.

Один из вариантов построения **измерителя динамических характеристик АМЗ с цифровой обработкой информации и автоматическим поиском начальной точки импульсной весовой функции** [257] приведен на рис. 2.16.

Принцип его действия заключается в следующем. Испытательный псевдослучайный образцовый сигнал с выхода генератора ГИС 7 записывается по исследуемому каналу аппаратуры точной магнитной записи АМЗ 12. Коррелометром К 16 определяется взаимная корреляционная функция сигнала, воспроизводимого с исследуемого канала АМЗ 12, и опорного восстановленного испытательного сигнала с выхода генератора ГИС 4, временной масштаб которого «отслеживает» колебания времени запаздывания сигнала в канале АМЗ 12. Значение этой взаимнокорреляционной функции в точке, определяемой временной задержкой опорного восстановленного испытательного сигнала относительно воспроизводимого (t_s), пропорционально значению импульсной весовой функции $q(t)$ исследуемого канала в точке $t = t_s$. Для получения необходимого числа точек импульсной весовой функции временная задержка t_s автоматически изменяется по команде с блока управления БУ 10 с помощью блока регулируемой задержки БРЗ 9. Переключателем П 6 устанавливается режим работы прибора: «циклический» или «разовый». При «циклическом» режиме работы с помощью блока управления БУ 10 и схемы «И» 21 после прохождения заданного числа интервалов задержки происходит

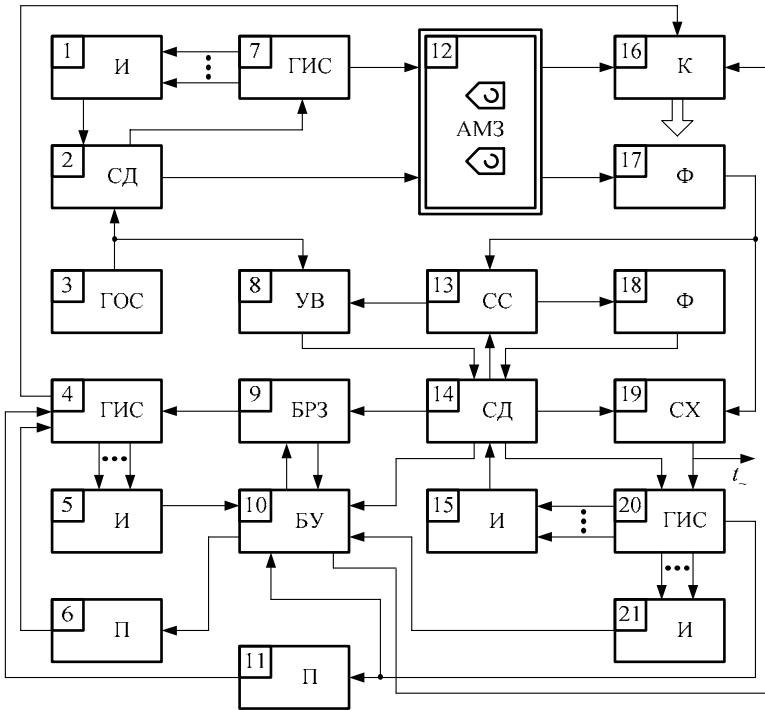


Рис. 2.16. Функциональная схема ИДХ

с цифровой обработкой информации и автоматическим поиском начальной точки импульсной весовой функции:

- И 1, И 5, И 15, И 21 — схема «И»; СД 2, СД 14 — счетчиковый делитель; ГОС 3 — генератор опорного сигнала; ГИС 4, ГИС 7, ГИС 20 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала; П 6, П 11 — переключатель; УВ 8 — управляемый вентиль; БРЗ 9 — блок регулируемой задержки; БУ 10 — блок управления; АМЗ 12 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи; СС 13 — схема сравнения (компаратор); К 16 — коррелометр; Ф 17, Ф 18 — формирователь; СХ 19 — синхронизатор

автоматический возврат задержки t_z к значению, соответствующему начальной точке измерений. Кроме того, возврат в начальную точку измерений может быть произведен вручную с помощью переключателя П 11 при любом режиме работы. По вспомогательному каналу аппаратуры точной магнитной записи АМЗ 12 записывается сигнал синхронизации («пилот-сигнал»), поступающий с выхода счетчикового делителя СД 2.

При воспроизведении с помощью этого сигнала, а также блоков УВ 8, СС 13, СД 14, Ф 17 и Ф 18 осуществляется «отслеживание» колебаний времени задержки, обусловленных нестабильностью скорости сигнала-носителя в режимах записи и воспроизведения.

Генератор испытательного сигнала ГИС 7 (так же, как и идентичные ему генераторы ГИС 4 и ГИС 20) построены на базе десятиразрядного сдвигового регистра, на вход первого разряда которого поступает сумма по модулю два сигналов, взятых с выходов третьего и десятого разрядов. Логическая схема «И» 1 (как и «И» 5, «И» 15, «И» 21) фиксирует определенное состояние регистра сдвига генератора ГИС 7 (ГИС 4, ГИС 20) путем выработки импульса один раз за период М-последовательности.

Генератор испытательного сигнала ГИС 7 имеет вход цепи сдвига, на который подается импульсная последовательность с выхода пятого разряда счетчикового делителя СД 2. Генератор испытательного сигнала ГИС 4, помимо аналогичных входов и выходов, имеет два дополнительных входа, по которым осуществляется подключение обратной связи с выхода сумматора по модулю два генератора ГИС 20, при этом собственная обратная связь в регистре генератора ГИС 4 отключается. Подключение такой обратной связи может происходить либо автоматически при циклическом режиме работы с помощью блока управления БУ 10, логической схемы И 21 и переключателя П 6 (имеющего два положения, соответствующие разовому и циклическому режимам работы), либо вручную с помощью переключателя П 11 («Начало измерений») при любом режиме работы. Этим достигается синфазная работа генераторов ГИС 4 и ГИС 20, что обеспечивает задержку опорного восстановленного испытательного сигнала на выходе генератора ГИС 4 относительно сигнала, воспроизводимого с исследуемого канала АМЗ 12, соответствующую начальной точке измерений. Генератор ГИС 20, в отличие от ГИС 7, имеет установочный вход, по которому импульсом с синхронизатора СХ 19 (схемы поиска) осуществляется установка регистра сдвига генератора ГИС 20 в состояние, при котором сигнал на его выходе оказывается синфазным с сигналом, воспроизводимым с исследуемого канала АМЗ 12.

Счетчиковый делитель СД 2 (СД 14) предназначен для формирования импульсов сдвига для генератора ГИС 7 (ГИС 4, ГИС 20) и импульсного напряжения синхронизации («пилот-сигнала»), поступающего на вход вспомогательного канала АМЗ 12 (с СД 14 — на один из входов схемы сравнения СС 13). Напряжение прямоугольной формы стабильной частоты с генератора опорного сигнала ГОС 3 поступает на счетный вход счетчикового делителя СД 2 и через управляемый вентиль УВ 8 — на счетный вход счетчикового делителя СД 14. Делитель СД 2 (СД 14)

представляет собой пересчетную схему, состоящую из 9 триггеров (разрядов). Импульсы с 5-го разряда делителя СД 2 (СД 14) подаются в цепь сдвига генератора ГИС 7 (ГИС 20). Коэффициент деления СД 2 (СД 14), вообще говоря, равен 2^9 , но один раз за период испытательного сигнала он становится равным ($2^9 - 2^5$) за счет добавления единицы в шестой разряд, происходящего с приходом импульса со схемы «И» 1 («И» 15) на установочный вход делителя СД 2 (СД 14). Таким образом, напряжение синхронизации («пилот-сигнал») представляет собой последовательность прямоугольных импульсов длительностью $8\Delta t$ (где Δt — период импульсов сдвига, т. е. импульсов с выхода пятого разряда) с паузами такой же длительности, кроме одной за период испытательного сигнала, длительность которой меньше на Δt , а именно — $7\Delta t$. Момент окончания этой укороченной паузы соответствует определенному состоянию регистра сдвига генератора ГИС 7 (ГИС 20). Эта особенность используется для автоматического ввода в синхронизм восстановленного испытательного сигнала на выходе генератора ГИС 20 с сигналом, воспроизводимым с исследуемого канала АМЗ 12. Кроме того, счетчиковый делитель СД 14 имеет еще три промежуточных выхода и дополнительный вход. Импульсная последовательность с одного из этих выходов поступает на сигнальный вход блока регулируемой задержки БРЗ 9 и далее - в цепь сдвига генератора ГИС 4. С двух других промежуточных выходов делителя СД 14 импульсное напряжение подается на один из дополнительных входов блока управления БУ 10 и на один из двух входов синхронизатора СХ 19 (схемы поиска) и используется для временного согласования выходных сигналов блока управления БУ 10 и синхронизатора СХ 19. По дополнительному входу на делитель СД 14 поступают сигналы с формирователя Ф 18, с помощью которых, а также с использованием формирователя Ф 17, управляемого вентиля УВ 8 и схемы сравнения СС 13 осуществляется «отслеживание» колебаний времени запаздывания «пилот-сигнала» в тракте записи–воспроизведения АМЗ 12.

Если напряжение синхронизации («пилот-сигнал»), воспроизводимое со вспомогательного канала АМЗ 12 и восстановленное формирователем Ф 17, которое поступает на один из двух входов синхронизатора СХ 19, не синхронизировано с аналогичным по форме напряжением на выходе счетчикового делителя СД 14, поступающим на другой вход синхронизатора СХ 19, то на выходе последнего вырабатывается импульс, соответствующий по времени окончанию укороченной паузы в импульсной последовательности на выходе формирователя Ф 17. Этим импульсом производится установка регистра сдвига генератора ГИС 20 в состояние, при котором сигнал на выходе, аналогичном выводу генератора ГИС 7, ока-

зывается синфазным с сигналом, воспроизводимым с исследуемого канала АМЗ 12. Кроме того, это изменение в работе генератора ГИС 20 через логическую схему «И» 15 влияет на работу счетчикового делителя СД 14 таким образом, что сигнал синхронизации на оконечном выходе делителя СД 14 оказывается синхронизированным с аналогичным по форме сигналом на выходе формирователя Ф 17.

Отслеживание колебаний времени запаздывания воспроизводимого сигнала в исследуемом канале записи–воспроизведения АМЗ 12 осуществляется по «пилот-сигналу», записанному по вспомогательному каналу АМЗ 12, с помощью блоков Ф 17, УВ 8, СС 13, Ф 18, СД 14. Схема сравнения СС 13 имеет два входа, на один из которых подается сигнал с формирователя Ф 17, а на другой — аналогичный по форме сигнал с оконечного выхода делителя СД 14. В СС 13 производится сравнение этих сигналов по фазе. Если сигнал на выходе СД 14 опережает по фазе сигнал с выхода формирователя Ф 17, то на одном из выходов схемы сравнения СС 13 появляется импульс, длительность которого соответствует рассогласованию фаз. Этот импульс поступает на управляющий вход вентиля УВ 8 и закрывает его, обеспечивая запрет прохождения одного или нескольких импульсов с выхода генератора стабильной частоты ГОС 3 на вход делителя СД 14, что приводит к соответствующей задержке (сдвигу во времени) выходного сигнала этого делителя. Если же упомянутый сигнал отстает по фазе, то на другом выходе схемы сравнения СС 13 вырабатывается импульс, который через формирователь Ф 18 поступает на установочный вход делителя СД 14, приводя последний в состояние, при котором фаза его выходного сигнала сдвигается в нужную сторону на соответствующее значение. Пороговая чувствительность схемы сравнения СС 13 к рассогласованию фаз сигнала соответствует длительности одного периода генератора опорного сигнала ГОС 3.

Коррелометр К 16 определяет значения взаимной корреляционной функции сигнала, воспроизводимого с исследуемого канала АМЗ 12, и восстановленного опорного сигнала, поступающего с выхода генератора ГИС 4, в точке, соответствующей временному сдвигу между этими сигналами. Коррелометр К 16 содержит три соединенные последовательно устройства: блок умножения, представляющий собой ключевую схему, управляемую опорным восстановленным сигналом, интегратор и вольтметр.

Блок БУ 10 управляет работой всех блоков ИДХ и обеспечивает автоматический и циклический процесс измерений. Он формирует следующие команды: «Останов», «Считывание» и «Сброс», поступающие на управляющий вход коррелометра К 16. Команда «Останов» подается на управляющий вход блока регулируемой задержки БРЗ 9. По этой команде

осуществляется запрет прохождения одного или нескольких (в зависимости от выбранного «шага» изменения задержки) импульсов. Кроме того, блок управления БУ 10 вырабатывает команду «Конец цикла», поступающую на управляющий вход блока регулируемой задержки БРЗ 9 и обеспечивающую возврат задержки к начальной точке измерений. Она вырабатывается в момент совпадения импульса с БРЗ 9, соответствующего моменту изменения задержки, и импульса с логической схемы «И» 21, фиксирующей определенное состояние регистра сдвига генератора ГИС 20.

Следует отметить, что импульсная последовательность с выхода синхронизатора СХ 19 содержит в себе информацию о колебаниях времени запаздывания сигнала в канале исследуемой аппаратуры точной магнитной записи.

Рассмотренные до сих пор измерители динамических характеристик использовали прямой способ измерений, в частности, метод непосредственной оценки значений импульсной весовой функции исследуемого канала АМЗ. Однако известно [159, с. 342], что дифференциальный (нулевой) метод измерений обеспечивает более высокую точность результатов измерений. В то же время применение дифференциального метода измерений предполагает использование образцового аналога (модели) исследуемого канала с регулируемыми параметрами. Создание образцовой АМЗ представляется трудноосуществимой технической задачей, поскольку, во-первых, реальный парк эксплуатируемой и разрабатываемой АМЗ характеризуется большим разнообразием основных ее технических параметров: количество каналов, их полоса пропускания, синхронность режимов записи и воспроизведения, возможность трансформации спектра, значение коэффициента колебаний скорости носителя и т. д., а, во-вторых, погрешность регистрации образцовой АМЗ должна быть более, чем в 2–3 раза меньше погрешности регистрации исследуемой АМЗ, в то время как разработчики аппаратуры точной магнитной записи прилагают максимум усилий, чтобы добиться минимально возможной погрешности АМЗ, используемой в составе ИИС и ИВК.

С учетом этих трудностей все же была сделана попытка предложить **дифференциальный метод измерения значений импульсной весовой функции канала АМЗ**, который рассматривался как исследуемый четырехполосник [258]. При этом предполагалось, что колебаниями скорости носителя можно пренебречь, а исследуемая АМЗ имеет одновременные режимы записи–воспроизведения без транспонирования скорости.

Принцип действия предложенного ИДХ, функциональная схема которого приведена на рис. 2.17, заключается в следующем.

Импульсная последовательность тактовой частоты с выхода генератора опорного сигнала ГОС 1 поступает в цепи сдвига генератора испытательного псевдослучайного сигнала ГИС 2 и блока задержки БЗ 3, а также через блок регулируемой задержки БРЗ 9 — в цепи сдвига ГИС 10 и БЗ 11. Выходная псевдослучайная импульсная последовательность с ГИС 2 подается на вход блока задержки БЗ 3 и на вход исследуемого четырехполюсника АМЗ 4. На k — выходах k -разрядного генератора испытательного сигнала ГИС 2 и m выходах m -разрядного блока задержки БЗ 3 вырабатываются $n = k + m$ псевдослучайных последовательностей, различающихся начальной фазой. Эти последовательности через соответствующие регуляторы напряжений РН 6 поступают на линейный аналоговый сумматор С 7. Регуляторы напряжений РН 6 и сумматор С 7 образуют образцовый четырехполюсник с регулируемыми параметрами, выходной сигнал которого вычитается в схеме сравнения СС 8 из выходного сигнала исследуемого четырехполюсника АМЗ 4. Разность этих сигналов подается на один из выходов коррелометра 12, на другой вход которого поступает задержанная образцовая псевдослучайная импульсная последовательность с выхода блока задержки БЗ 11.

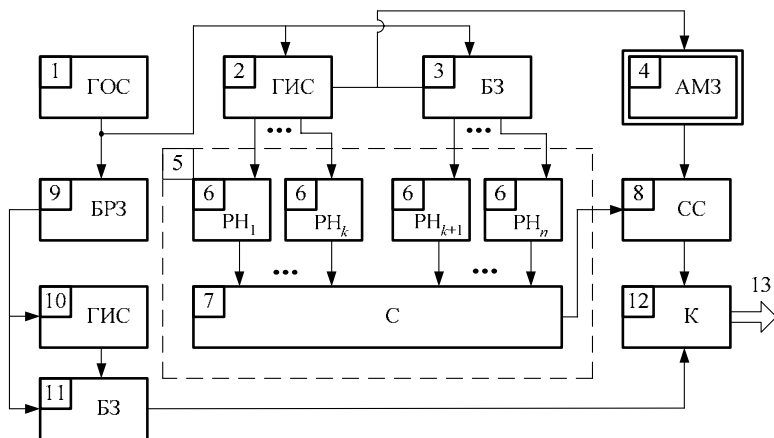


Рис. 2.17. Функциональная схема ИДХ для измерения значений динамических характеристик АМЗ дифференциальным методом:

- ГОС 1 — генератор опорного сигнала; ГИС 2, ГИС 10 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала; БЗ 3, БЗ 11 — блок задержки;
- АМЗ 4 — исследуемый канал (четыреполюстник);
- 5 — образцовый четырехполюстник с регулируемыми параметрами;
- РН 6 — регуляторы напряжения; С 7 — сумматор; СС 8 — схема сравнения;
- БРЗ 9 — блок регулируемой задержки; К 12 — коррелометр

Коррелометр К 12 вырабатывает сигнал, пропорциональный разности импульсных весовых функций исследуемого и образцового четырехполосника при значении временного аргумента $t + t_i$, равном времени задержки, регулируемой с помощью БРЗ 9, между выходными последовательностями генераторов испытательного псевдослучайного сигнала ГИС 2 и ГИС 10. Значение выходного сигнала коррелометра К 12 зависит от коэффициента передачи того регулятора напряжения РН_і 6, номер i которого совпадает с числом тактов задержки выходной последовательности генератора ГИС 10. С помощью этого регулятора добиваются минимума (в идеале — нулевого) значения выходного сигнала 13 коррелометра К 12, выполняющего роль нуль-органа. При этом коэффициент передачи упомянутого регулятора будет пропорционален значению импульсной весовой функции исследуемого канала при $t = t_i$.

При ступенчатом изменении времени задержки на шаг t_i с помощью БРЗ 9 последовательно определяются все значения импульсной весовой функции. На каждом шаге задержки, по-существу, используется статический режим измерений. Следует отметить, что суммарное число разрядов ГИС 2 и БЗ 3 (соответственно, ГИС 10 и БЗ 11) выбирается, исходя из требований, предъявляемых к числу дискретных точек, в которых необходимо определить значения импульсной весовой функции канала. Так, для четырехполосника, описываемого линейным дифференциальным уравнением пятого порядка, достаточно, чтобы $n = 20 \div 30$.

2.4.2. Методы определения фазо-частотных характеристик каналов аппаратуры точной магнитной записи

В [259–266] был предложен и описан метод когерентных частот для измерения нелинейности фазо-частотных характеристик (ФЧХ) каналов аппаратуры точной магнитной записи, характеризующихся неопределенностью времени задержки регистрируемых сигналов и, как следствие, неизвестным углом наклона ФЧХ. В качестве испытательного сигнала в нем используется сумма когерентных напряжений кратных частот с известными фазовыми соотношениями.

Принцип действия **измерителя нелинейности ФЧХ каналов АМЗ** поясняется функциональной схемой [260], приведенной на рис. 2.18, и состоит в следующем.

С генератора опорного сигнала ГОС 1 синусоидальный сигнал с частотой f_0 , выбираемой равной верхней граничной частоте полосы пропускания исследуемого канала АМЗ 4, через регулятор напряжения РН 2 поступает на один из двух входов линейного сумматора С 3. На его второй вход поступает синусоидальное напряжение кратной частоты с выхода блока когерентных частот БКЧ 13.

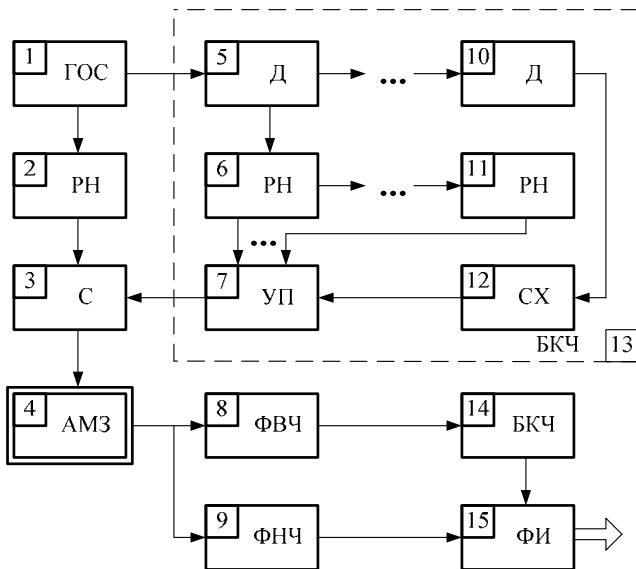


Рис. 2.18. Функциональная схема измерителя нелинейности ФЧХ: ГОС 1 — генератор опорного сигнала; РН 2, РН 6, ..., РН 11 — регулятор напряжения; С 3 — сумматор; АМЗ 4 — исследуемый канал аппаратуры точной магнитной записи; Д 5, ..., Д 10 — делитель; УП 7 — управляемый переключатель; ФВЧ 8 — фильтр верхних частот; ФНЧ 9 — фильтр низких частот; СХ 12 — синхронизатор; БКЧ 13, БКЧ 14 — блок когерентных частот; ФИ 15 — фазоизмеритель (фазометр)

Этот блок включает в себя счетчиковый делитель на триггерах со счетным входом Д 5, ..., Д 10, регуляторы напряжения РН 6, ..., РН 11, синхронизирующее устройство СХ 12 и управляемый переключатель УП 7.

На вход БКЧ 13 с ГОС 1 подается импульсное напряжение с той же частотой f_0 . Эта импульсная последовательность делится по частоте делителями Д 5, ..., Д 10, включающими в себя фильтры нижних частот для выделения первых гармоник поделенной частоты. Если напряжение U_0 с выхода генератора ГОС 1 имеет вид

$$U_0 = U_{m0} \cdot \sin 2\pi f_0 t, \quad (2.54)$$

то напряжение с выхода i -го делителя, которое поступает через соответствующий регулятор напряжения РН на один из входов управляемого переключателя УП 7, будет иметь вид:

$$U_i = U_{mi} \cdot \sin 2\pi \frac{f_0}{2^i} t. \quad (2.55)$$

Синхронизатор СХ 12 управляет переключателем УП 7, который последовательно подключает на выход БКЧ 13 один из входов УП 7. Синхронизатор представляет собой счетчиковый делитель, на вход которого подаются импульсы с выхода последнего делителя Д 10. Напряжения с выходов управляемого переключателя УП 7 и генератора ГОС 1 (через РН 2) линейно складываются на сумматоре С 3. Напряжение сложной формы с выхода сумматора С 3 подается на вход АМЗ 4 для записи. На магнитном носителе записываются «пачки» напряжений сложной формы, причем каждая из них состоит из двух спектральных составляющих с частотами f_0 и $f_0/2^i$.

При воспроизведении «пачки» напряжений сложной формы с выхода АМЗ 4 подаются одновременно на входы фильтров верхних частот ФВЧ 8 и нижних частот ФНЧ 9. На выходе ФВЧ 8 выделяется напряжение

$$U_0' = U_{m0}' \cdot \sin 2\pi f_0 t, \quad (2.56)$$

фазовый сдвиг которого можно положить равным нулю, поскольку оно используется в качестве опорного. Это напряжение подается на вход БКЧ 14, которое по своему устройству идентично БКЧ 13. С выхода БКЧ 14 снимается напряжение

$$U_i' = U_{mi}' \cdot \sin \left(2\pi \frac{f_0}{2^i} t + \varphi_i \right). \quad (2.57)$$

Напряжения с выходов БКЧ 14 и ФНЧ 9 подаются на два входа фазоизмерителя ФИ 15 (фазометра или измерителя временных интервалов). При измерении временных интервалов τ_i значения нелинейности ФЧХ $\Delta\varphi(f)$ рассчитываются по формуле

$$\Delta\varphi_i(f_i) = 2\pi \frac{f_0}{2^i} \tau_i. \quad (2.58)$$

Таким образом, измеритель нелинейности ФЧХ позволяет автоматически измерять фазовые сдвиги в точках частотной шкалы, равномерно распределенных по оси абсцисс (частот) в полулогарифмическом масштабе.

Практическое использование описанного измерителя нелинейности ФЧХ показало, что имеющиеся «выпадения» сигнала в канале магнитной записи–воспроизведения исследуемой АМЗ (особенно низкого класса

точности и качества) приводят к сбоям в синхронизации «пачек» напряжения сложной формы и вызванной этими сбоями недостоверности результатов отдельных серий измерений.

Для устранения этого недостатка предложено усовершенствованное устройство [262], обеспечивающее получение более достоверных результатов измерений за счет **автоматической периодической принудительной синхронизации**, функциональная схема которого приведена на рис. 2.19.

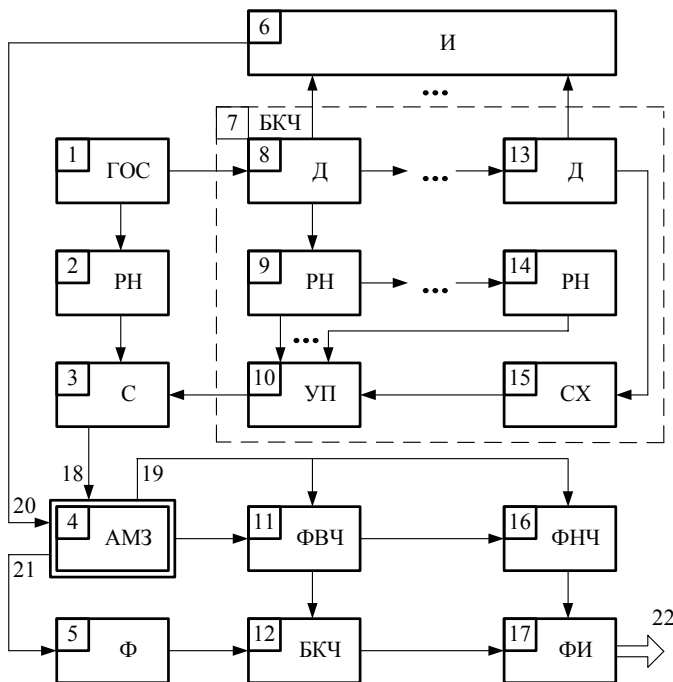


Рис. 2.19. Функциональная схема измерителя нелинейности ФЧХ последовательного типа с автоматической принудительной синхронизацией:

- ГОС 1 — генератор опорного сигнала; РН 2, РН 9, ..., РН 14 — регулятор напряжения; С 3 — сумматор; АМЗ 4 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи; Ф 5 — формирователь; И 6 — логическая схема «И»; БКЧ 7, БКЧ 12 — блок когерентных частот; Д 8, ..., Д 13 — делитель; УП 10 — управляемый переключатель (коммутатор); ФВЧ 11 — фильтр верхних частот; СХ 15 — синхронизатор; ФНЧ 16 — фильтр низких частот; ФИ 17 — фазоизмеритель (фазометр)

Принцип его действия отличается от [260] наличием логической схемы «И» 6, формирователя Ф 5 и использованием для записи и воспроизведения импульса принудительной синхронизации дополнительного (вспомогательного — со входом 20 при записи и выходом 21 при воспроизведении) канала АМЗ 4. Этот импульс вырабатывается один раз за наибольший период испытательного сигнала, получаемого на выходе управляемого переключателя УП 10, и при воспроизведении подается после формирователя Ф 5 в цепь сброса (установки нулевого состояния) делителей блока когерентных частот БКЧ 12. Измерение значений нелинейности ФЧХ осуществляется последовательно в точках полосы пропускания канала АМЗ 4 (вход 18, выход 19), отличающихся по частоте для двух соседних точек в два раза.

Для обеспечения возможности одновременного измерения сдвига фаз в каждой выбранной точке частотного диапазона, что значительно ускоряет процесс измерений, предложен **измеритель нелинейности ФЧХ параллельного типа** [261], функциональная схема которого приведена на рис. 2.20.

Принцип его действия заключается в следующем. Напряжение прямоугольной формы со скважностью два тактовой частоты f_0 , выбираемое равной верхней граничной частоте полосы пропускания исследуемого канала АМЗ 12, с выхода генератора опорного сигнала ГОС 1 поступает на вход счетчикового делителя на триггерах СД 7, ..., СД 16 и через регулятор напряжения РН 2 — на один из входов линейного сумматора С 18. С выхода каждого триггера СД 7, ..., СД 16 напряжения прямоугольной формы с частотой $f_0/2^i$, где i — номер триггера счетчикового делителя, через регуляторы напряжения РН 8, ..., РН 17 подаются на остальные входы сумматора С 18. На выходе сумматора С 18 получается испытательный сигнал в виде взвешенной суммы напряжений прямоугольной формы. При выборе коэффициентов передачи регуляторов напряжения РН 8, ..., РН 17 таким образом, чтобы $U_i = U_0 \cdot 2^i$, где U_0 — амплитуда напряжения на выходе РН 2, а U_i — амплитуда напряжения с выхода i -го регулятора напряжения РН 8, ..., РН 17, на выходе сумматора С 18 получается псевдослучайный испытательный сигнал, по своей форме приближающийся к пилообразному напряжению и имеющий большой перепад один раз за период. Эта особенность испытательного сигнала используется для синхронизации при воспроизведении. С помощью дифференцирующей цепи ДЦ 9, амплитудного селектора АС 3 и формирователя Ф 4 из воспроизведенного с АМЗ 12 сигнала выделяется короткий импульс один раз за его период. Этот импульс подается в цепь сброса счетчикового делителя на триггерах СД 5, ..., СД 6 и осуществляет

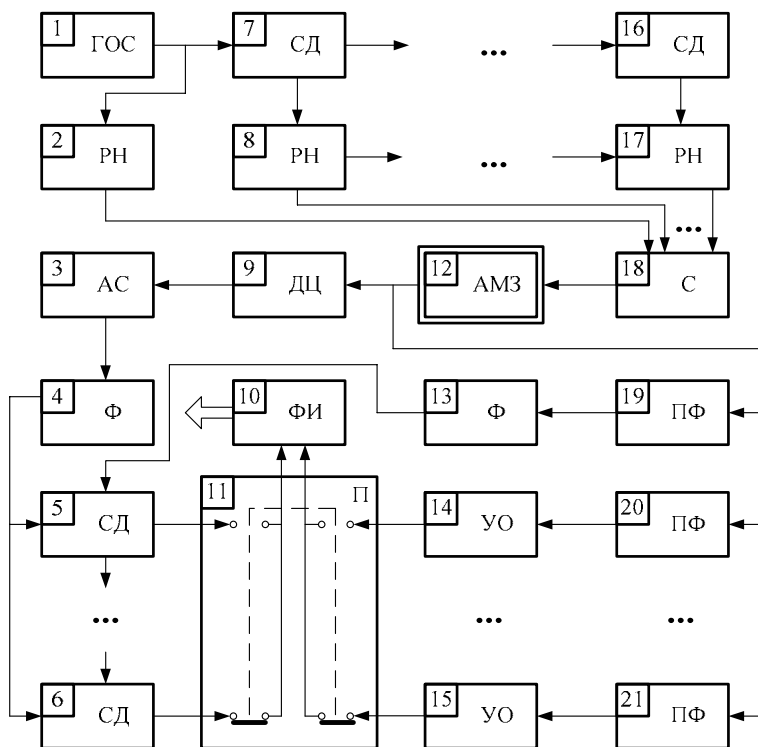


Рис. 2.20. Функциональная схема измерителя нелинейности ФЧХ параллельного типа:

- ГОС 1 — генератор опорного сигнала;
 РН 2, РН 8, ..., РН 17 — регулятор напряжения;
 АС 3 — амплитудный селектор; Ф 4, Ф 13 — формирователь;
 СД 5, ..., СД 6, СД 7, ..., СД 16 — счетчиковый делитель;
 ДЦ 9 — дифференцирующая цепь; Ф И 10 — формирователь;
 П 11 — переключатель; АМЗ 12 — исследуемый канал аппаратуры точной магнитной записи; УО 14, ..., УО 15 — усилитель-ограничитель;
 С 18 — сумматор; ПФ 19, ..., ПФ 21 — полосовой фильтр

его принудительную синхронизацию с воспроизводимым сигналом. На счетный вход счетчикового делителя на триггерах СД 5, ..., СД 6 поступают с выхода формирователя Ф 13 импульсы с частотой f_0 , выделенные полосовым фильтром ПФ 19. Остальные полосовые фильтры ПФ 20, ..., ПФ 21 выделяют из воспроизводимого сигнала гармонические напряжения с частотами $f_i = f_0/2^i$, $i = 1, \dots, n$. Эти гармонические

напряжения преобразуются в прямоугольную форму усилителями-ограничителями УО 14, ... , УО 15 и поступают на входы переключателя П 11. На другие входы этого переключателя подаются импульсные напряжения с выхода триггеров счетчикового делителя СД 5, ... , СД 6. Переключатель П 11 управляется вручную или автоматически и позволяет выбрать для измерения на ФИ 10 любую пару напряжений с выхода триггеров СД 5, ... , СД 6 и усилителей-ограничителей УО 14, ... , УО 15. Если использовать n фазоизмерителей ФИ, то обеспечивается параллельный режим измерения нелинейности фазо-частотной характеристики. Таким образом, в приборе обеспечивается и защита от сбоев, и возможность параллельного измерения нелинейности ФЧХ в выбранных точках.

Во всех трех модификациях [260–262] измерителей нелинейности ФЧХ заложена возможность их самокалибровки, т. е. выявления систематических погрешностей (и поправок) в каждой точке частотного диапазона, а также среднего квадратического отклонения при замене канала исследуемой аппаратуры точной магнитной записи безинерционным четырехполосником с нулевым сопротивлением.

Таким образом, предложены два метода определения импульсных весовых функций:

- корреляционный метод прямых измерений значений ИВФ с пятью модификациями для различных типов АМЗ;

- корреляционный нулевой метод определения ИВФ;

а также два метода когерентных частот для измерения значений нелинейности фазо-частотных характеристик каналов АМЗ:

- последовательного типа (с двумя модификациями);

- параллельного типа [252–264].

Новизна предложенных технических решений защищена 11 авторскими свидетельствами СССР на изобретения [252–262], из которых [252–257, 259, 260, 262] внедрены в метрологическую практику.

2.5. Методы оценки нелинейных искажений и колебаний времени запаздывания сигнала в каналах аппаратуры точной магнитной записи

Метод экспериментальной оценки погрешности магнитной регистрации [242] привлекает тем, что результат может быть получен оперативно и характеризует качество функционирования канала магнитной записи - воспроизведения в целом. На практике, однако, зачастую необходима более подробная информация о свойствах канала. Поэтому кроме «интегральной» оценки качества работы канала, целесообразно разработать

методы и средства измерений, позволяющие оценить частные составляющие результирующей погрешности, вызванные неидеальностью нормируемых метрологических характеристик канала. Эти экспериментальные данные важны и в теоретическом отношении, так как их использование дает возможность уточнить модель образования результирующей погрешности магнитной регистрации, обосновать алгоритм суммирования частных составляющих погрешности и решить вопрос о степени их независимости друг от друга. При этом желательно обеспечить, чтобы оценка одного вида искажений определялась с исключением влияния на нее остальных видов искажений.

Не менее важны эти данные и в практическом отношении, так как позволяют наметить пути улучшения характеристик аппаратуры точной магнитной записи, выделяя факторы, которые вносят в результирующую погрешность наибольший вклад и с которыми надо бороться в первую очередь.

Кроме оценки динамических характеристик и искажений, представляют интерес методы экспериментального определения нелинейности амплитудной характеристики и нелинейных искажений; уровня помех и шумов в канале АМЗ, а также колебаний времени запаздывания сигнала измерительной информации в канале магнитной записи–воспроизведения, которые вызывают деформацию временного масштаба и могут рассматриваться как причина дополнительной погрешности регистрации.

Методы оценки нелинейности амплитудной характеристики четырехполюсника, в том числе и канала АМЗ, а также суммарного уровня шумов и помех были предложены и рассмотрены в [145, 267–269]. Для оценивания нелинейных искажений сигнала типа «белого шума» в канале АМЗ предложен [270, 271] корреляционный метод измерений, основанный на определении импульсных весовых функций канала для большого и малого уровней испытательного сигнала.

Функциональная схема **измерителя нелинейных искажений** [271] приведена на рис. 2.21.

Сущность метода заключается в следующем. По исследуемому каналу ИК 2 аппаратуры точной магнитной записи АМЗ 7 поочередно записывают испытательный сигнал в виде псевдослучайной двоичной последовательности максимальной длины, генерируемой ГИС 11, с различной амплитудой. Один раз запись производится с максимальным для канала уровнем (переключатель П 1 в левом положении), другой раз — с малым уровнем (переключатель П 1 в правом положении). На вспомогательный канал ВК 16 аппаратуры АМЗ 7 записывают опорный сигнал тактовой частоты с выхода генератора ГОС 15.

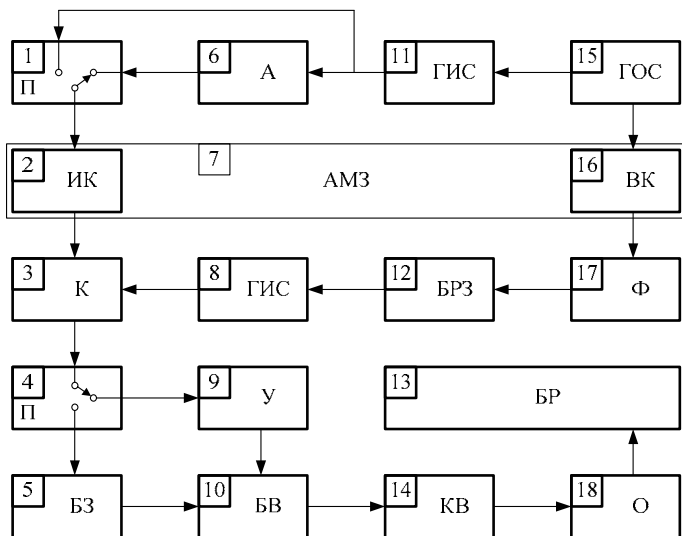


Рис. 2.21. Функциональная схема измерителя нелинейных искажений типа «белого шума» в канале АМЗ:

П 1, П 4 — переключатель; ИК 2 — исследуемый канал АМЗ;
 К 3 — коррелометр; БЗ 5 — блок задержки; А 6 — аттенуатор;
 АМЗ 7 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи;
 У 9 — усилитель; БВ 10 — блок вычитания; БРЗ 12 — блок регулируемой задержки; БР 13 — блок регистрации (вольтметр);
 ГОС 15 — генератор опорного сигнала; ВК 16 — вспомогательный канал АМЗ;
 Ф 17 — формирователь; О 18 — осреднитель (интегратор)

При воспроизведении опорный сигнал с выхода ВК 16 формируют, задерживают во времени с использованием блоков Ф 17 и БРЗ 12 и воссоздают из него с помощью генератора ГИС 8 псевдослучайную последовательность. Коррелометр К 3 определяет взаимную корреляционную функцию воссозданного и воспроизведенного сигналов. Тем самым измеряются значения импульсной весовой функции исследуемого канала ИК 2 для испытательного сигнала малого и большого уровня. Затем значения ИВФ, полученные с использованием испытательного сигнала малого уровня, умножают с помощью усилителя У 9 на коэффициент, равный отношению большого и малого уровней испытательного сигнала при записи (т. е. на коэффициент, обратный коэффициенту передачи аттенуатора А 6). В блоке вычитания БВ 10 получают разность между задержанными в БЗ 5 значениями ИВФ, полученными с большим уровнем ис-

пытательного сигнала, и умноженными усилителем У 9 значениями ИВФ, полученными с малым уровнем испытательного сигнала. Сигнал разности возводят в квадрат, осредняют и измеряют в блоках КВ 14, О 18 и БР 13 для определения его дисперсии.

При большом уровне регистрируемого испытательного сигнала используется полный амплитудный диапазон исследуемого канала АМЗ, амплитудная характеристика которого обладает некоторой нелинейностью. Выходной сигнал канала в этом случае может быть приближенно представлен в виде интеграла Дюамеля:

$$y(t) \cong \int_0^{\infty} q(t-\tau) \cdot x(\tau) d\tau. \quad (2.59)$$

При малом уровне испытательного сигнала $x(\tau)/k$ используется лишь малая часть амплитудной характеристики канала, которую можно считать практически линейной. Поэтому импульсная весовая функция $q_0(t-\tau)$, определенная при малом сигнале, отличается от ИВФ $q(t-\tau)$, измеренной при большом сигнале. Выходной сигнал канала после масштабирования (т. е. умножения на коэффициент k) будет иметь вид:

$$y_0(t) \cong k \int_0^{\infty} q_0(t-\tau) \cdot \frac{x(\tau)}{k} d\tau = \int_0^{\infty} q_0(t-\tau) \cdot x(\tau) d\tau. \quad (2.60)$$

Дисперсия нелинейных искажений D_n оценивается, как

$$D_n = \overline{(y - y_0)^2} = \overline{\left[\int_0^{\infty} (q - q_0) x(\tau) d\tau \right]^2}, \quad (2.61)$$

и при $x(\tau) = \delta(\tau)$, т. е. в том случае, когда на вход канала подается сигнал в виде δ -функции Дирака с постоянной по частоте спектральной плотностью мощности («белый шум»), (2.61) можно записать в виде

$$D_n = \overline{(q - q_0)^2} \quad (2.62)$$

Для практического использования предложенного метода достаточно экспериментально определить импульсную весовую функцию исследуемого канала при двух уровнях испытательного сигнала. Остальные операции можно провести расчетным путем.

Одной из основных метрологических характеристик АМЗ являются **колебания времени запаздывания сигнала в канале**, вызванные дрейфом и колебаниями скорости сигналоносителя как в режиме записи, так и

в режиме воспроизведения. Попытки характеризовать АМЗ коэффициентом колебания скорости или коэффициентом детонации дают информацию о качестве лентопротяжного механизма аппаратуры, но не обеспечивают получения достаточных данных о результирующих искажениях временного масштаба воспроизведенного сигнала, что и представляет интерес с метрологической точки зрения, поскольку они являются причиной появления дополнительной погрешности магнитной регистрации. Это объясняется тем, что колебания скорости V_z сигналоносителя в режиме записи и воспроизведения неидентичны, имеют сложную форму и представляют собой параметрический процесс, а само время запаздывания $\Theta(t)$ сигнала в канале определяется из интегрального уравнения

$$\int_0^{\Theta(t)} V(z) dz = 0 \quad (2.63)$$

где оно является верхним пределом интегрирования. Решение такого уравнения неоднозначно и на практике неприменимо. Поэтому важно обеспечить решение задачи экспериментального измерения колебаний времени запаздывания относительно номинального значения, которое зачастую несущественно.

Для этой цели был предложен **корреляционный метод определения колебаний времени запаздывания** [146, 272], сущность которого заключается в следующем. На исследуемый канал АМЗ записывают испытательный сигнал в виде псевдослучайной двоичной последовательности с тактовой частотой, период которой превышает максимальный размах колебаний времени запаздывания. Далее определяют значения взаимной корреляционной функции воспроизведенного и испытательного сигналов, для чего задерживают испытательный сигнал на такой интервал, чтобы обеспечить измерения на одном из наклонных участков взаимно-корреляционной функции.

Для проведения измерений тактовая частота сдвиговых импульсов выбирается значительно более низкой, чем верхняя граничная частота полосы пропускания исследуемого канала. Тем самым обеспечивается выполнение двух условий: во-первых, испытательный сигнал проходит через канал с малыми динамическими искажениями, вследствие чего взаимнокорреляционная функция входного и выходного сигналов канала мало отличается от автокорреляционной функции испытательного сигнала, имеющей треугольный пик один раз за период (рис. 2.9б); во-вторых, длительность каждого из наклонных ее участков, равная периоду следования импульсов сдвига, заведомо превышает максимальный размах ко-

лебаний времени запаздывания. При правильном выборе величины задержки испытательного сигнала среднее время запаздывания соответствует середине наклонного участка взаимнокорреляционной функции. А поскольку наклонный участок этой функции линеен, то такой прибор представляет собой линейный преобразователь колебаний времени запаздывания в выходное электрическое напряжение коррелометра, которое может быть далее подвергнуто анализу для определения его статистических параметров.

Предельным частным случаем такого устройства является прибор, в котором генератор испытательного сигнала является источником прямоугольной импульсной последовательности со скважностью два, т. е. меандра, обладающего функцией временной связи (аналогичной по алгоритму определения автокорреляционной функции) симметричного треугольного пилообразного вида.

Для получения результатов измерений в цифровом виде предложен **метод измерения колебаний времени запаздывания сигнала в канале АМЗ** [273, 274], который поясняется функциональной схемой, приведенной на рис. 2.22.

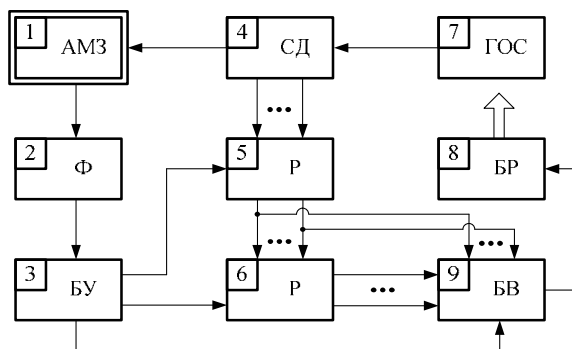


Рис. 2.22. Функциональная схема измерителя колебаний времени запаздывания сигналов в канале АМЗ:

- АМЗ 1 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи;
 Ф 2 — формирователь; БУ 3 — блок управления; СД 4 — счетчиковый делитель;
 Р 5, Р 6 — регистр; ГОС 7 — генератор опорного сигнала;
 БР 8 — блок регистрации; БВ 9 — блок вычитания

Сущность метода заключается в следующем. По исследуемому каналу АМЗ 1 записывается и воспроизводится периодический испытательный сигнал (см. рис. 2.23), причем перед записью делят частоту опорного сигнала, а при воспроизведении формируют импульсы с периодом считан-

ного сигнала. В моменты их появления фиксируют мгновенные результаты деления частоты опорного сигнала, запоминают их, сравнивают соседние результаты и по текущей разности судят о колебаниях времени запаздывания.

Импульсная последовательность с генератора опорного сигнала стабильной частоты ГОС 7 через счетчиковый делитель СД 4 поступает в режиме записи на вход исследуемого канала АМЗ 1. При воспроизведении формирователь Ф 2 вырабатывает короткие импульсы $U_{\text{воспр}}$, следующие с периодом считанного сигнала $(T_c)_i$, которые поступают на блок управления БУ 3. Блок управления выдает команды на регистры Р 5 и Р 6, а также на блок вычитания БВ 9. По этим командам в регистр Р 5 записывается число, образованное в этот момент состояниями всех разрядов счетчикового делителя СД 4 (мгновенный результат деления). В то же время в регистре Р 6 хранится число, которое записывалось в регистр Р 5 по предыдущему импульсу команды (соседний результат деления). Два соседних результата сравниваются с помощью блока вычитания БВ 9, т. е. вычисляется разность

$$\Delta\Theta_i = \Theta_i - \Theta_{i-1} \quad (2.64)$$

между числами в регистрах Р 5 и Р 6.

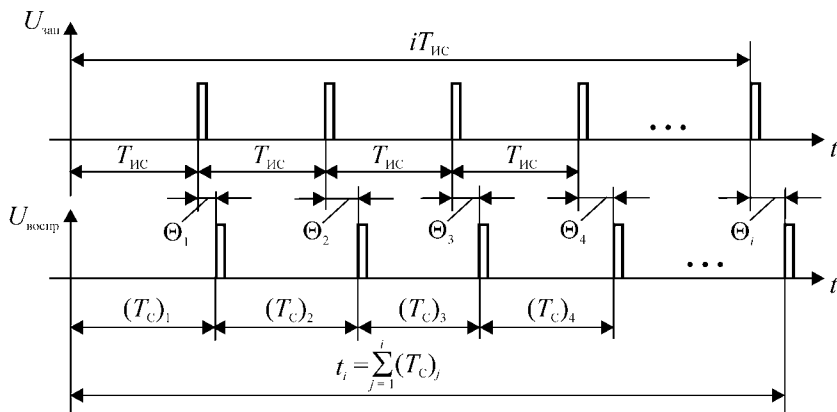


Рис. 2.23. Временные диаграммы, поясняющие сущность метода измерения колебаний времени запаздывания сигналов в исследуемом канале аппаратуры точной магнитной записи:

$U_{\text{вх}}$ — сигнал на входе АМЗ в режиме записи; $U_{\text{воспр}}$ — сигнал на выходе АМЗ в режиме воспроизведения (после формирователя Ф 2 на рис. 2.22); $T_{\text{ис}}$ — период испытательного сигнала; $(T_c)_i$ — период воспроизведенного сигнала; Θ_i — значение времени запаздывания

Эта разность соответствует изменению $\Delta\Theta_i$ времени запаздывания за прошедший период считанного испытательного сигнала. Далее, по следующей команде блока управления БУ 3 производится выдача результата сравнения в блок регистрации БР 8 и перепись числа из регистра Р 5 в регистр Р 6. С приходом следующего импульса $U_{\text{воспр}}$ процесс измерений повторяется. В отличие от корреляционного метода измерений колебаний времени запаздывания этот метод работоспособен и при наличии дрейфа скорости сигналоносителя, а также при имеющихся небольших отличиях скорости лентопротяжного механизма в режимах записи и воспроизведения.

Таким образом, для оценивания нелинейных свойств канала АМЗ предложены:

- метод автоматизированного определения нелинейности амплитудных характеристик [267, 269];
- корреляционный метод оценки нелинейных искажений сигнала типа «белого шума» [270, 271].

Для измерения колебаний времени запаздывания сигнала в каналах АМЗ предложены:

- корреляционный метод с использованием псевдослучайного сигнала [265, 266, 272];
- цифровой метод, позволяющий оценить не только колебания, но и дрейф времени запаздывания [273, 274].

Новизна предложенных технических решений подтверждена получением трех авторских свидетельств СССР на изобретение [269, 271, 273], два из которых [271, 273] внедрены в метрологическую практику.

ГЛАВА III. АППАРАТУРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТУРЫ ТОЧНОЙ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ

3.1. Средства намерений для экспериментального определения метрологических характеристик каналов аппаратуры точной магнитной записи

3.1.1. Измерители погрешности магнитной регистрации

На основе материалов, приведенных в пп. 2.2 и 2.3, разработаны три варианта образцовых средств измерений, обеспечивающих осуществление поверки аналоговой аппаратуры точной магнитной записи, в которых реализованы изобретения [242, 245, 247]. Первый из них получил название «Измеритель погрешности магнитной регистрации» [265, 266], второй — «Прибор для поверки аппаратуры магнитной записи», а третий — «Прибор для определения погрешности АМЗ» [275, 276].

В «Измерителе погрешности магнитной регистрации» (ИПМР) в качестве генератора испытательного сигнала в соответствии с 2.2 и рекомендациями, приведенными в [81], применен рекуррентный регистр сдвига, охваченный через сумматор по модулю два такой обратной связью, что при подаче импульсов в цепь сдвига регистра на выходе любого разряда последнего образуется псевдослучайная двоичная последовательность максимальной длины (М-последовательность), период которой

$$T = (2^n - 1)\tau, \quad (3.1)$$

где: n — число разрядов в регистре; τ — период импульсов сдвига.

Среди свойств М-последовательности, вид которой приведен на рис. 2.9, необходимо отметить следующие [67]:

- в генерируемой М-последовательности отсутствует кодовая комбинация, состоящая из одних нулевых символов, т. е. все разрядные ячейки регистра не могут одновременно находиться в нулевом состоянии;
- число нулевых символов, следующих подряд, ограничено и не превышает $(2n - 3)$;

– число единичных символов, следующих подряд, также ограничено и не превышает значения $(3n - 3)$. При этом импульс длительностью, равной $(3n - 3)t$, присутствует в испытательном сигнале только один раз за его период T , что позволяет сравнительно просто решить задачу его синхронизации с искаженным сигналом, воспроизводимым с канала исследуемой АМЗ.

В разработанном средстве измерений ИПМР предусмотрено два режима работы:

- режим I — без «отслеживания» изменений времени запаздывания;
- режим II — с «отслеживанием» изменений времени запаздывания.

Кроме того, работа прибора меняется в зависимости от того, имеет ли исследуемая аппаратура одновременно существующие режимы записи и воспроизведения, или эти режимы включаются только поочередно.

Функциональная схема прибора в режиме I при раздельной записи и воспроизведении приведена на рис. 3.1.

При записи (рис. 3.1*а*) напряжение стабильной частоты с генератора ГОС 1 подается на вход формирователя Ф 2, который преобразует синусоидальное напряжение в импульсы прямоугольной формы. Частота этой импульсной последовательности делится далее семиразрядным счетчиковым делителем СД 3 с коэффициентом деления 128, построенном на триггерах со счетным входом. Импульсы с выхода СД 3 поступают в цепь сдвига регистра Р 4, входящего в состав генератора испытательного сигнала ГИС 7. Частота импульсов сдвига f_c в приборе выбрана равной удвоенной верхней граничной частоте рабочего диапазона частот исследуемого канала АМЗ ($f_{вз} = 5$ кГц):

$$f_c = 2f_{вз} = 10 \text{ кГц.} \quad (3.2)$$

Изменение частотного диапазона испытательного сигнала в зависимости от полосы пропускания исследуемого канала осуществляется путем соответствующей замены ФНЧ 5 и выбора частоты импульсов сдвига f_c .

Псевдослучайная последовательность, образующаяся на выходе регистра Р 4, подается на фильтр нижних частот ФНЧ 5, частота среза которого равняется $f_{вз}$. Испытательный сигнал с выхода ФНЧ 5 записывается по исследуемому каналу АМЗ 6. ФНЧ 5 имеет регулировки «нуля» и «уровня», с помощью которых параметры испытательного сигнала согласуются с амплитудным диапазоном исследуемого канала.

При воспроизведении (рис. 3.1*б*) напряжение стабильной частоты с генератора ГОС 1 через формирователь Ф 2, счетчиковый делитель СД 3, регистр сдвига Р 4 и фильтр нижних частот ФНЧ 5 поступает на вход вычитающего блока вычитания БВ 11 в блоке измерения погрешности

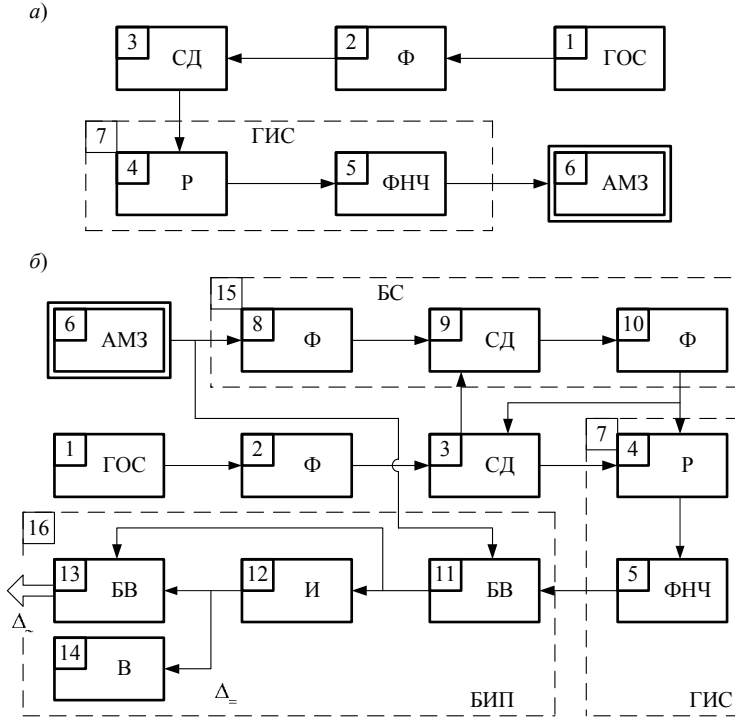


Рис. 3.1. Функциональная схема ИМПР для отдельных режимов «записи» и «воспроизведения» в режиме I:

ГОС 1 — генератор опорного сигнала; Ф 2, Ф 8, Ф 10 — формирователь; СД 3, СД 9 — счетчиковый делитель; Р 4 — регистр сдвига; ФНЧ 5 — фильтр нижних частот; АМЗ 6 — исследуемый канал аппаратуры точной магнитной записи; ГИС 7 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала; БВ 11, БВ 13 — блок вычитания; И 12 — интегратор; В 14 — вольтметр; БС 15 — блок синхронизации; БИП 16 — блок измерения погрешности

БИП 16 и служит воссозданным опорным (образцовым) сигналом $U_{on}(t)$. Воспроизведенный с исследуемого канала АМЗ 6 искаженный сигнал $U_e(t)$ поступает на вход уменьшаемого блока вычитания БВ 11, на выходе которого получается разность:

$$\Delta(t) = U_e(t) - U_{on}(t), \quad (3.3)$$

соответствующая мгновенным значениям абсолютной погрешности магнитной регистрации. Кроме того, воспроизведенный сигнал с выхода

АМЗ 6 подается на вход формирователя Ф 8 блока синхронизации БС 15, содержащего последовательное соединение Ф 8, счетчикового делителя СД 9 (аналогичного СД 3), формирователя Ф 10, счетчикового делителя СД 3, предназначенного для выделения единственного за период самого длинного «единичного» импульса длительностью 27τ и установки по заданному фронту этого импульса счетчикового делителя СД 3 и регистра сдвига Р 4 в состояние, соответствующее синхронизации сравниваемых воспроизведенного и опорного сигналов.

Сигнал, пропорциональный погрешности регистрации $\Delta(t)$, получаемый на выходе БВ 11, подается на вход уменьшаемого блока вычитания БВ 13, на вход вычитаемого которого поступает постоянная (систематическая) составляющая $\Delta_c = \Delta_-$ сигнала погрешности, выделенная интегратором И 12. Таким образом, на выходе БВ 13 получается переменная (случайная) составляющая $\overset{0}{\Delta} = \Delta_{\approx}$ погрешности Δ :

$$\Delta_{\approx} = \Delta(t) - \Delta_- . \quad (3.1.1.4)$$

Систематическая составляющая Δ_- погрешности измеряется вольтметром (стрелочным прибором) В 14. Кроме того, предусмотрены выходы как Δ_{\approx} , так и Δ_- , для более точного их измерения (или анализа) с использованием подсоединяемых приборов.

В режиме I прибор может работать также с АМЗ, имеющей только одновременно существующие «запись» и «воспроизведение». В этом случае используется дополнительные ГИС и фильтр нижних частот, идентичный по своим параметрам фильтру ФНЧ 5. Следует отметить, что вследствие неизбежной на практике неидентичности динамических характеристик двух ФНЧ, погрешность измерений увеличится и составит 4 % (по данным, полученным экспериментально в режиме самопроверки).

Функциональная схема ИПМР, работающего в режиме II при раздельной записи и воспроизведении, приведена на рис. 3.2.

Отличие в работе прибора в режиме II от режима I (рис. 3.1) заключается в использовании «пилот-сигнала», записываемого одновременно с испытательным сигналом на соседнюю дорожку магнитного носителя, и в особенностях выработки импульсов сдвига, поступающих на регистры генератора испытательного сигнала ГИС 7. Так, при записи в режиме II (рис. 3.1.2a) это напряжение с выхода счетчикового делителя СД 3 подается на счетный вход триггера Т 18. Импульсное напряжение прямоугольной формы («меандр») с выхода Т 18 (с частотой $f_c / 2 = f_{\text{вз}}$) поступает на вход ФНЧ 19, частота среза которого, как и ФНЧ 5, равняется верхней граничной частоте $f_{\text{вз}}$ полосы пропускания канала АМЗ 6.

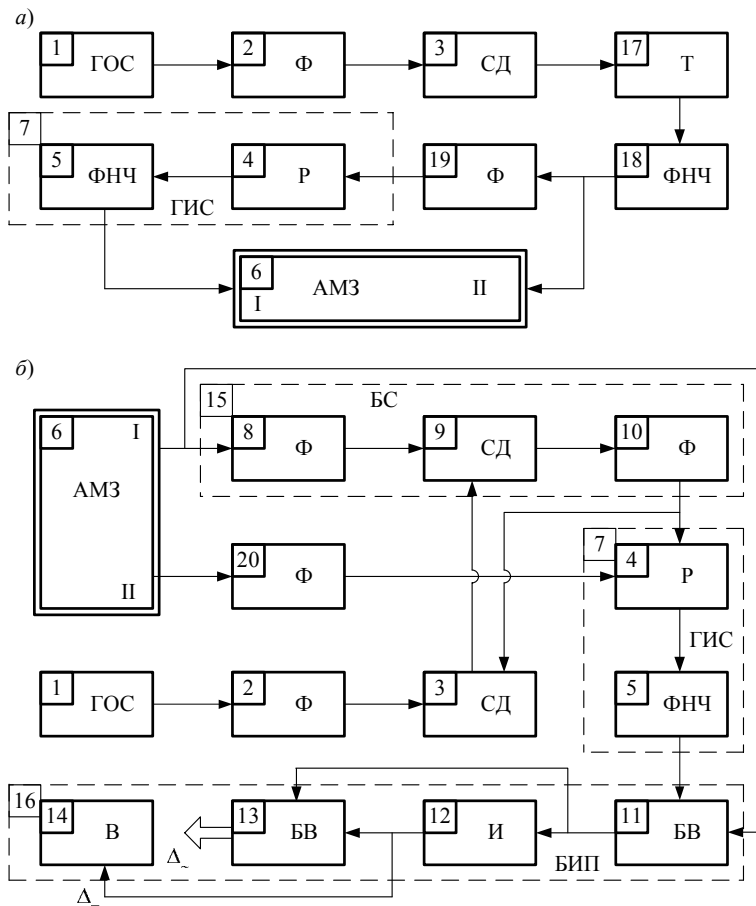


Рис. 3.2. Функциональная схема ИПМР

для отдельных «записи» и «воспроизведения» в режиме II:
 ГОС 1 — генератор опорного сигнала; Ф 2, Ф 8, Ф 10, Ф 19, Ф 20 —
 формирователь; СД 3, СД 9 — счетчиковый делитель; Р 4 — регистр сдвига;
 ФНЧ 5, ФНЧ 18 — фильтр низких частот; АМЗ 6 — исследуемый канал
 аппаратуры точной магнитной записи; ГИС 7 — генератор испытательного
 псевдослучайного сигнала; БВ 11, БВ 13 — блок вычитания;
 В 14 — вольтметр; БС 15 — блок синхронизации;
 БИП 16 — блок измерения погрешности; Т 17 — триггер

При воспроизведении (рис. 3.2б) импульсы сдвига, поступающие в
 цепь сдвига регистра Р 4 для получения на выходе ГИС 7 воссозданного

опорного испытательного сигнала, формируются на Ф 21 из «пилот–сигнала», воспроизводимого со вспомогательного канала II АМЗ 6. Поскольку «пилот–сигнал» и испытательная псевдослучайная последовательность записываются одновременно на соседние дорожки одного и того же магнитного носителя, то и изменения их временных масштабов из-за колебаний скорости носителя, скольжения и неравенства средних скоростей при записи и воспроизведении практически синхронны. Этим обеспечивается «отслеживание» изменений времени запаздывания сигнала в исследуемом канале АМЗ 6 и исключение их влияния на результаты измерения погрешности регистрации.

Следует отметить, что при измерениях в режиме II опорный испытательный сигнал воссоздается с высокой точностью, так как и при записи, и при воспроизведении используется один и тот же генератор ГИС 7. Положительным свойством использованного блока синхронизации БС 15 является также то, что введение в синхронизм периодически «подтверждается», устраняя вредные последствия возможных сбоев (выпадений сигнала) из-за дефектов магнитной ленты.

Внешний вид изготовленного прибора показан на рис. 3.3. Вставные блоки слева и справа — сменные фильтры нижних частот ФНЧ 5 и ФНЧ 19; стрелочный прибор М4204 градуируется в показания систематической составляющей погрешности; в левой части лицевой панели — контрольные гнезда; в правой части лицевой панели — разъемы для подключения внешних измерительных приборов; тумблер включения питания; орган регулировки «уровня» и клемма заземления.

Конструктивно он представляет собой блок габаритами 300×130×380 мм. Он имеет 2 сменных блока фильтров нижних частот и 3 платы, вставляющиеся через «okoшко» в задней стенке прибора.

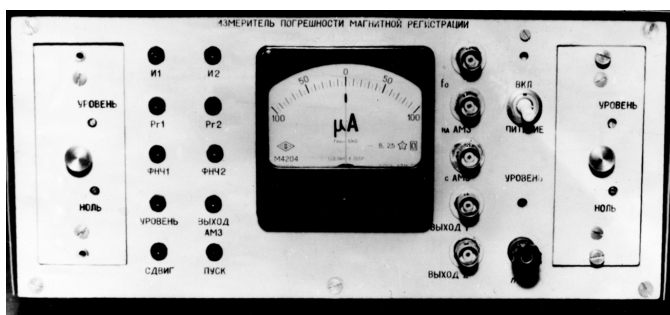


Рис. 3.3. Внешний вид «Измерителя погрешности магнитной регистрации»

На одной из плат смонтированы два регистра сдвига, счетчиковые делители частоты и схема блока синхронизации. На двух других платах собраны схемы блока измерения погрешности и коммутации режимов работы прибора. В приборе внедрены изобретения [242, 245]. Технические и метрологические характеристики «Измерителя погрешности магнитной регистрации» и «Прибора для проверки аппаратуры магнитной записи» приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Технические и метрологические характеристики
«Измерителя погрешности магнитной регистрации» и
«Прибора для проверки аппаратуры магнитной записи»**

Характеристика	Область значений
Частотный диапазон испытательного сигнала (Гц)	0–5000*
Число спектральных составляющих испытательного сигнала в рабочем диапазоне частот	512
Интервал между частотными составляющими (Гц)	10*
Уровень огибающей спектральных составляющих на частотах (Гц):	
0	1
5000	0,5
Ослабление испытательного сигнала выше верхней граничной частоты частотного диапазона (дБ / октаву), не менее	54
Амплитудный диапазон (В)	0–(+ 6)**
Входное сопротивление (кОм), не менее	80
Выходное сопротивление (кОм), не более	8
Предел допускаемой приведенной погрешности в режиме самопроверки (%), не более:	
для систематической составляющей	± 0,1
для случайной составляющей (среднее квадратическое отклонение)	4
Частные составляющие основной погрешности:	
нестабильность частоты внешнего задающего генератора опорного синусоидального напряжения, не более	± 1 · 10 ⁻⁶
нестабильность уровней ограничения «нулей» и «единиц» на выходе регистров сдвига (%), не более	0,1
неидентичность АЧХ фильтров нижних частот (%)	от – 2,2 до + 0,2

Продолжение таблицы 3.1

Характеристика	Область значений
неидентичность ФЧХ фильтров нижних частот (градусы), не более	7
дрейф «нуля» блоков вычитания в течение 3 часов (%), не более	$\pm 0,1$
нелинейность амплитудной характеристики блоков вычитания (%), не более	$\pm 0,2$
неидентичность дифференциальных усилителей блоков вычитания по разным входам (%), не более	$\pm 0,6$
неидентичность АЧХ блоков вычитания по двум входам (%)	от $-1,4$ до $0,2$
Напряжение питания (В)	220 (± 10 %)
от сети с частотой (Гц)	50
Потребляемая мощность (Вт), не более	6
Время непрерывной работы (ч), не менее	8

* Имеется возможность изменения диапазона за счет выбора опорной частоты и смены фильтров нижних частот;

** Предусмотрена регулировка «нуля» и «уровня».

В соответствии с проектом поверочной схемы для АМЗ, приведенной на рис. 2.2а, «Измеритель погрешности магнитной регистрации» (а также аналогичный ему по техническим и метрологическим характеристикам «Прибор для поверки аппаратуры магнитной записи») является образцовым средством измерений высшей точности, получает размер единиц от средств измерений из Государственной поверочной схемы единицы электродвижущей силы [217], единиц времени и частоты [218] и подлежит метрологической аттестации путем поэлементного исследования основных метрологических характеристик с тем, чтобы на основе полученной при этом информации оценить погрешность прибора.

Основными источниками погрешности измерений, осуществляемых этим прибором, являются:

– нестабильность частоты внешнего задающего генератора синусоидального напряжения как во времени, так и от температуры (генератор используется, по-существу, как мера времени);

– нестабильность уровней ограничения символов «нулей» и «единиц», поступающих с регистров сдвига на фильтры нижних частот (вольтметр, используемый для измерения уровней ограничения и их нестабильности, передает размер единицы электрического напряжения постоянного тока);

- неидентичность амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик фильтров нижних частот и блоков вычитания;
- дрейф «нуля» блоков вычитания во времени;
- неидентичность и нелинейность амплитудных характеристик дифференциальных усилителей блоков вычитания по обоим входам;
- отличие коэффициента передачи блоков вычитания и фильтров нижних частот от номинального и его нестабильность;
- неточность временной синхронизации опорного сигнала с воспроизводимым.

Было проведено экспериментальное исследование основных метрологических характеристик прибора, результаты которого отражены в табл. 3.1 [266].

Стабильность частоты кварцованного генератора синусоидального напряжения, который был использован в эксперименте, проверялась с помощью частотомера типа Ч 3-14. Погрешность измерения частоты равнялась ± 1 младшего разряда, т. е. составила ± 1 Гц. Частота генератора соответствовала 1 МГц. Стабильность частоты была не хуже $\pm 1 \cdot 10^{-6}$. Кроме того, необходимо учесть, что стабильность частоты на выходе счетчикового делителя СД 3 еще на два порядка выше, так как коэффициент деления последнего равен 128. Отсюда можно сделать вывод о том, что составляющая погрешности, вызванная этим фактором, пренебрежимо мала и ее можно не учитывать.

Нестабильность уровней ограниченного псевдослучайного двоичного сигнала обусловлена, в основном, тремя причинами: нестабильностью напряжения постоянного тока, питающего регистры сдвига, нестабильностью уровней «нуля» и «единицы» элементов, образующих разряд регистра, и нестабильностью уровней ограничения в схеме фиксации уровней. Напряжение питания регистров составляет + 5 В и обеспечивается стабилизированным источником питания с нестабильностью выходного напряжения (по паспортным данным) не более 0,3 мВ (за счет пульсаций). Используемые элементы серии 133 характеризуются нестабильностью уровней «нуля» и «единицы» порядка 0,3 мВ. Нестабильность уровней ограничения в схеме фиксации уровня — 0,3 мВ. Таким образом, результирующая нестабильность уровней составляет около 0,1 % и является пренебрежимо малой при оценке инструментальной погрешности прибора.

Неравномерность АЧХ фильтров нижних частот измерялась с использованием генератора сигналов типа Г 4-102, с выхода которого напряжение подавалось на вход соответствующего ФНЧ, и цифрового вольтметра типа ВК 7-10 А/1, с помощью которого измерялось действующее значение напряжения на входе и выходе фильтра в каждой выбранной точке

частотного диапазона. Анализ результатов намерений показал, что номинальный коэффициент передачи обоих фильтров, соответствующий отношению выходного напряжения фильтра ко входному, равен единице. Частота среза обоих фильтров составляет 5 кГц при крутизне среза 54 дБ / на октаву. Неравномерность АЧХ первого ФНЧ находилась в пределах от $-1,5\%$ до $+2,2\%$, для второго ФНЧ — от -7% до $+4,1\%$. Разность коэффициентов передачи фильтров находилась в пределах от $-2,2\%$ до $+0,2\%$. Расчеты, проведенные по формуле [265, 266, 145]:

$$D_d = \frac{P_0}{\pi(\omega_g - \omega_n)} \int_{\omega_n}^{\omega_g} [\Delta K(\omega)]^2 d\omega, \quad (3.4)$$

где D_d — дисперсия динамической погрешности; P_0 — мощность испытательного сигнала со спектральной плотностью, равномерной в рабочем диапазоне частот аппаратуры $[\omega_n, \omega_g]$; $\Delta K(\omega)$ — ненормальность коэффициента передачи, показывают, что погрешность измерений за счет неидентичности АЧХ фильтров нижних частот составляет доли процента.

Значения фазо-частотных характеристик ФНЧ измерялись с помощью частотомера типа Ч 3-14, работавшего в режиме измерения длительности Δt интервала А–Б. С генератора сигналов типа Г 3-51 синусоидальное напряжение выбранной частоты подавалось на вход соответствующего фильтра нижних частот и вход А частотомера. Вход Б последнего соединялся с выходом ФНЧ. Фаза определялась по формуле:

$$\varphi = 360 \cdot f \cdot \Delta t \text{ (град.)}. \quad (3.5)$$

Анализ результатов измерений показывает, что среднее время задержки двух ФНЧ составляет 175 и 179 мкс. Нелинейность ФЧХ составляет $\pm 17^\circ$ ($\pm 5\%$).

Разность средних интервалов задержки фильтров равна 4 мкс. Неидентичность их ФЧХ не превышает 7° . Таким образом, в соответствии с (3.4) погрешность за счет неидентичности ФЧХ фильтров также составляет доли процента.

По результатам экспериментов дрейф «нуля» блоков вычитания при $U_{ax1} = U_{ax2} = 2,964$ В не превысил 2 мВ. Таким образом, погрешность, обусловленная дрейфом «нуля» блоков вычитания составляет около 0,1 %.

Нелинейность амплитудных характеристик блока вычитания измерялась для каждого из входов дифференциального усилителя (при этом другой его вход заземлялся). Анализ результатов измерений показал, что коэффициент передачи по обоим входам равен 0,533 и нелинейность амплитудных характеристик не превышает $\pm 0,2\%$. Неидентичность коэффициентов передачи блока вычитания по двум входам не превышала $\pm 0,6\%$.

Неидентичность АЧХ блоков вычитания по двум входам находилась в пределах от $-1,4\%$ до $+0,2\%$. Были измерены значения АЧХ блока вычитания при подаче на оба его входа одного и того же сигнала с уровнем $3,008\text{ В}$. В пределах от 100 Гц до 10 кГц уровень выходного напряжения не превысил 2 мВ (погрешность менее $0,1\%$).

Для того, чтобы избежать довольно трудоемкого и кропотливого исследования, имеющего целью определить закон суммирования частных составляющих погрешностей, вызванных неидеальностью метрологических характеристик перечисленных элементов, был проделан следующий эксперимент.

В схеме, представленной на рис. 3.2, вместо АМЗ 6 было сделано непосредственное соединение. Таким образом, методом самопроверки была оценена инструментальная погрешность, образованная частными составляющими практически всех блоков функциональной схемы. Систематическая составляющая погрешности не превысила $0,1\%$, а приведенное среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности составило 4% .

С помощью созданного «Измерителя погрешности магнитной регистрации» были проведены исследования метрологических характеристик аппаратуры точной магнитной записи с лентопротяжным механизмом «Астра-В», АМЗ типа «Астра-2В» – «Астра-144Н», канала магнитной записи–воспроизведения с использованием лентопротяжного механизма аппаратуры «Астра-2В» – «Астра-144Н», разработанного предприятием п/я В-2518, и комплекса аппаратуры записи - воспроизведения образцовых сигналов (табл. 3.2). В частности, получены следующие результаты.

Таблица 3.2

Исследованная аппаратура магнитной записи

Название исследованной аппаратуры и ее тип	Средства измерений, использованные для исследований, номера чертежей и изобретений	Время проведения исследований	Цель исследований	Примечание
Аппаратура магнитной записи-воспроизведения типа «Астра-2В» – «Астра-144Н»	Измеритель погрешности магнитной регистрации (М-15325), № № 473125, 538310	01.12.75–08.12.75	Экспериментальная оценка точности магнитной записи	Исследования проведены на предприятии п/я В-2518

Продолжение таблицы 3.2

Название исследованной аппаратуры и ее тип	Средства измерений, использованные для исследований, номера чертежей и изобретений	Время проведения исследований	Цель исследований	Примечание
Канал магнитной записи—воспроизведения с использованием ЛПМ аппаратуры «Астра-2В» – «Астра-144Н»	— « —	09.12.75–11.12.75	— « —	Разработчик канала — предприятие п/я В-2518
Комплекс аппаратуры записи—воспроизведения образцовых сигналов	— « —	1975	— « —	Разработчик комплекса — предприятие п/я А-1742 (тема 01.12.54.75)
Устройство ввода данных в аппаратуру статистического анализа типа КСИЧ	Измеритель нелинейности фазо-частотных характеристик, № № 288141, 296054, 541124	1975	Оценка динамических характеристик АМЗ в виде неравномерности АЧХ и относительной нелинейности ФЧХ	Разработчик аппаратуры - предприятие п/я А-1742
Бытовой магнитофон типа «Романтик»	— « —	— « —	— « —	—
Аппаратура точной магнитной записи с лентопротяжным механизмом «Астра-В»	Измеритель динамических характеристик (М-14786), № № 442437, 474840, 501366, 513372; 547831; 562863	1975–1976	Метрологическая аттестация АМЗ	Разработчик аппаратуры — предприятие п/я А-1742

Продолжение таблицы 3.2

Название исследованной аппаратуры и ее тип	Средства измерений, использованные для исследований, номера чертежей и изобретений	Время проведения исследований	Цель исследований	Примечание
Магнитограф типа 4 МИЗВ	— « —	1976	— « —	Разработчик — Львовский ПИ
Аналоговая аппаратура магнитной записи типа БПР-1	Прибор для определения погрешности АМЗ (черт. 16991), № № 585539, 473125	1978–1979	Метрологическое обеспечение средств измерений Заказчика	Работа выполнялась по х/д 1470 для предприятия п/я В-2289 по теме 01.14.00.05
Аппаратура магнитной записи типа МИР-6	— « —	— « —	— « —	— « —
Аппаратура точной магнитной записи типа МО-22-01	Блок управления установки для поверки информационно - измерительных систем (Хд 2.390.056), № 556492	16.12.81–21.01.82	Получение закона распределения колебаний времени запаздывания сигналов в канале магнитной записи–воспроизведения	Разработчик АМЗ типа МО-22-01 — предприятие п/я А-1742 по теме 01.12.54.06

Для аппаратуры точной магнитной записи с ЛПМ «Астра-В» в результате проведенных измерений получено, что приведенное среднее квадратическое отклонение случайной погрешности магнитной регистрации составило 2,5 %. Для сравнения была подсчитана по методике, разработанной в [145], теоретическая оценка погрешности передачи сигнала по измерительному каналу АМЗ, которая соответствовала 2,2 %. Таким образом, теоретическая и экспериментальная оценки «разошлись» при-

мерно на 10 %, что подтверждает правильность выбора метрологической модели образования погрешности АМЗ в п. 2.2 и удовлетворительную точность разработанной методики ее теоретического расчета, а также косвенно дает уверенность в результатах метрологической аттестации ИПМР.

При поверке АМЗ типа «Астра-2В» – «Астра-144Н», технические и метрологические характеристики которой приведены в табл. 3.3, получены результаты, приведенные в табл. 3.4.

Таблица 3.3

Технические и метрологические характеристики многоканальной аналоговой аппаратуры точной магнитной записи типа «Астра-2В» – «Астра-144Н»

Характеристика	Область значений
Частотный диапазон регистрируемых сигналов (Гц) при скорости 76,2 см/с	0–5000
Вид модуляции	ЧИМ
Скорость транспортирования магнитной ленты (см/с)	4,7; 9,53; 19,05; 38,1; 76,2
Отклонение скорости (%), не более	1
Нестабильность скорости (%), не более	± 0,35
Суммарный коэффициент детонации по сквозному тракту на скорости 4,76 см/с (%), не более	1
Амплитудный диапазон входного сигнала (В) при девиации несущей частоты (%)	от 0 до + 6,3 40
Входное сопротивление измерительного канала по постоянному току (кОм), не менее	80
Неравномерность АЧХ сквозного тракта (дБ), не более	± 1,5
Нелинейность амплитудной характеристики по постоянному и переменному току во всей полосе частотного диапазона (%), не более	2
Коэффициент нелинейных искажений по сквозному тракту (%), не более	4
Отношение сигнал / шум по сквозному тракту (дБ), не более, для скоростей (см/с)	
4,76; 9,53	35
19,05; 38,1; 76,2	40
Количество каналов	14

Таблица 3.4

Результаты экспериментального определения приведенных систематической и случайной составляющих основной инструментальной погрешности магнитной регистрации сигналов аналоговой аппаратурой точной магнитной записи типа «Астра-2В» – «Астра-144Н»

Номер канала АМЗ и тип используемой магнитной ленты	Место ленты в рулоне					
	Начало рулона		Середина рулона		Конец рулона	
	$\gamma_{\text{сист.}} \%$	$\gamma_{\text{случ.}} \%$	$\gamma_{\text{сист.}} \%$	$\gamma_{\text{случ.}} \%$	$\gamma_{\text{сист.}} \%$	$\gamma_{\text{случ.}} \%$
Канал 1, лента 6Д	-1,6	9,6	-1,8	9,5	-2,2	9,6
Канал 7, лента 6Д	-0,1	7,5	-0,6	7,5	-0,9	8,5
Канал 7, лента И 4403	-0,7	8,0	-1,4	7,6	-1,3	7,6

Анализ результатов измерений показал, что приведенное значение среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности магнитной регистрации сигнала не превышает 9,6 % с доверительной вероятностью 0,9, что полностью соответствует теоретической оценке [265] точности магнитной записи, проведенной по методике, разработанной в [145]. Систематическая составляющая погрешности магнитной регистрации сигнала (от -2,2 % до -0,1 %) обусловлена неточностью калибровки канала, предусмотренной в аппаратуре «Астра-2В» – «Астра-144Н», а также временным и температурным дрейфами в процессе эксперимента.

«Прибор для определения погрешности АМЗ» создан [275–277] для проверки аналоговой аппаратуры точной магнитной записи, в частности — типа БПР-1 и МИР-6. В приборе реализованы изобретения [242, 247].

Функциональная схема прибора приведена на рис. 2.7, структурная схема — на рис. 3.4, внешний вид — на рис. 3.5, а основные технические и метрологические характеристики — в табл. 3.5.

Особенности работы прибора заключаются в следующем. Напряжение синхронизации представляет собой гармонический сигнал, поступающий от внешнего генератора (например, типа Г 3-102) через разъем «F₀» на входное устройство блока синхронизации БС 1 для формирования напряжений: опорного и синхронизации. Амплитуда одной из полувольт напряжения синхронизации в определенный, наперед заданный момент времени, а именно — в момент прихода импульса с генератора испытательного сигнала ГИС 8, формируется значительно большей, чем остальные. Таким образом, момент формирования этой «меченой» полувольты определяется генератором ГИС 8, т. е. временным положением формируемого испытательного сигнала. Напряжение синхронизации

выводится на разъем «Выход синхр.» и записывается по соседнему с испытываемым каналу АМЗ.

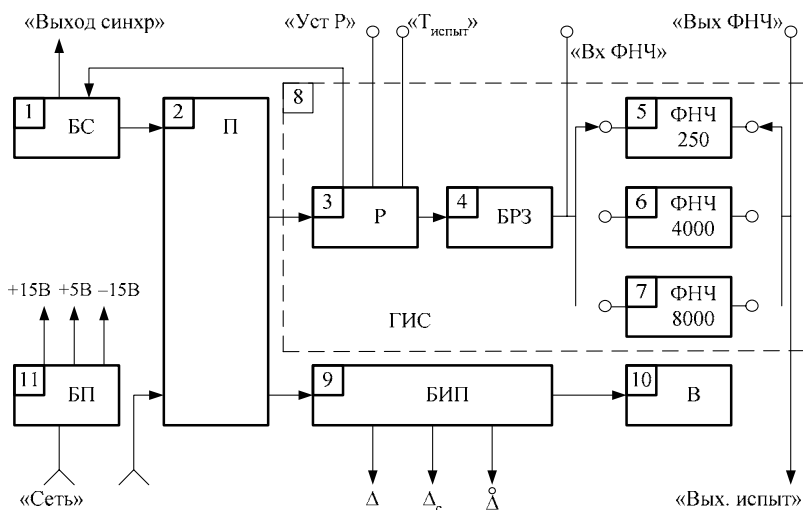


Рис. 3.4. Структурная схема

«Прибора для определения погрешности АМЗ»:

- БС 1 — блок синхронизации; П 2 — переключатель «Род работы» («Запись»–«Воспр»–«Контр»); Р 3 — регистр сдвига; БРЗ 4 — блок регулируемой задержки псевдослучайной двойной последовательности; ФНЧ 5, ФНЧ 6, ФНЧ 7 — фильтр нижних частот с частотой среза 250 Гц, 4000 Гц, 8000 Гц соответственно; ГИС 8 — генератор испытательного сигнала; БИП 9 — блок выделения и измерения погрешности; В 10 — вольтметр; БП 11 — блок питания



Рис. 3.5. Внешний вид «Прибора для определения погрешности АМЗ»

Таблица 3.5

**Технические и метрологические характеристики
«Прибора для определения погрешности АМЗ»**

Характеристика	Область значений
Частотный диапазон испытательного сигнала (Гц):	
I диапазон	0 – 250
II диапазон	0 – 4000
III диапазон	0 – 8000
Ослабление испытательного сигнала выше верхней граничной частоты каждого частотного диапазона (дБ / октаву), не менее	50
Амплитудный диапазон (В), не менее	± 6
Уровень смещения испытательного сигнала (В) при допустимом отклонении ± 1 %	+ 3
Входное сопротивление (кОм), не менее	100
Выходное сопротивление (Ом), не более	100
Предел допускаемой абсолютной основной погрешности для АМЗ с колебаниями скорости сигналоносителя до 0,05 % (мВ), не более, для систематической составляющей для случайной составляющей (среднее квадратическое отклонение):	± 3,5
I диапазон	1
II диапазон	3
III диапазон	4
Предел допускаемой дополнительной погрешности (в долях от основной) при изменении напряжения питания в пределах от –15 % до +10 %, не более	0,5
Напряжение питания (В) от сети частотой (Гц)	220 (± 10 %) 50
Потребляемая мощность (Вт), не более	5
Время непрерывной работы (ч), не менее	8

Опорное напряжение, формируемое из гармонического сигнала внешнего генератора, представляет собой напряжение прямоугольной формы (меандр) с частотой следования импульсов, равной частоте входного сигнала. Опорное напряжение поступает через переключатель «Род работы» П 2 во входные цепи ГИС 8.

Выходными сигналами генератора ГИС 8 являются:

– испытательный сигнал, представляющий собой периодический псевдослучайный сигнал, согласованный по частотному и амплитудному диапазонам с соответствующими характеристиками поверяемой АМЗ. Он выводится на разъем «Выход испыт.» и записывается по исследуемому каналу АМЗ;

– импульсное напряжение с частотой следования импульсов, равной частоте повторения испытательного сигнала. Эти импульсы поступают на блок синхронизации БС 1 для формирования «меченой» полуволны в напряжении синхронизации. Кроме того, импульсное напряжение выводится на контрольное гнездо «Т_{испыт.}» и используется для синхронизации развертки осциллографа (например, типа С 1-55), с помощью которого производится контроль наличия испытательного сигнала при записи.

При воспроизведении с двух каналов АМЗ одновременно считываются два сигнала: напряжение синхронизации и испытательный сигнал. Из напряжения синхронизации, поступающего через разъем «Вход синхр.», формируются импульсы установки регистра сдвига «Уст. Р» и опорное напряжение. Опорное напряжение, представляющее собой меандр, подается на входные цепи ГИС 8 для формирования из него импульсов сдвига. Поскольку считываемые одновременно испытательный сигнал и напряжение синхронизации претерпевают одинаковые временные искажения, то и испытательный (воссозданный) сигнал на выходе ГИС 8, полученный с помощью импульсов сдвига, сформированных из считываемого сигнала синхронизации, будет претерпевать те же временные искажения.

Импульсы установки регистра Р 3, сформированные из «меченых» полуволн сигнала синхронизации, устанавливают Р 3 в состояние, при котором в режиме «Запись» формировались импульсы для образования «меченой» полуволны, т. е. обеспечивают синхронизацию воссозданного и считанного испытательных сигналов.

Испытательный сигнал, считанный с канала АМЗ, через разъем «Вход испыт.» подается на один из входов блока выделения и измерения погрешности БИП 9. На другой вход БИП 9 поступает воссозданный испытательный сигнал с выхода ГИС 8. Выходными сигналами БИП 9 являются:

Δ — погрешность регистрации, равная мгновенной разнице входных сигналов БИП 9 (разъем « Δ »);

Δ_c — систематическая составляющая погрешности (разъем « Δ_c »);

Δ_0 — случайная составляющая погрешности (разъем « Δ_0 »).

Вольтметр В 10 со стрелочным индикатором измеряет среднее выпрямленное значение случайной составляющей погрешности:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left| \Delta \right| dt.$$

По минимуму показаний этого индикатора производится плавная подстройка синхронизации с помощью блока регулируемой задержки БРЗ 4 для компенсации постоянного временного сдвига между каналами, по которым велась запись испытательного сигнала и напряжения синхронизации соответственно.

Кроме рабочих режимов «Запись» и «Воспроизведение» в приборе предусмотрен контрольный режим («Контр.»). В этом режиме оба входа БИП 9 освобождаются от внутренних связей и выводятся на внешние разъемы («Вход испыт.» и «Выход испыт.»), что позволяет:

- производить поверку БИП 9 по известным испытательным сигналам, подключаемым извне;
- использовать БИП 9 в качестве блока вычитания аналоговых электрических сигналов, изменяющихся от -5 В до $+5$ В в частотном диапазоне от 0 до 10 кГц.

Прибор аттестован в соответствии с разработанной [275, 276] Методикой аттестации и периодической поверки «Прибора для определения погрешности АМЗ». Кроме того, разработаны «Методика поверки аппаратуры магнитной записи» и «Методика определения интервала запаздывания между каналами записи–воспроизведения аппаратуры типа БПР-1 [276].

3.1.2. Измерители динамических характеристик каналов АМЗ

На основе материалов, приведенных в пп. 2.2 и 2.4, разработаны две разновидности средств измерений, обеспечивающих экспериментальное определение динамических характеристик аппаратуры точной магнитной записи: «Измеритель динамических характеристик» для измерения значений импульсной весовой функции канала АМЗ и «Измеритель нелинейности ФЧХ» для измерения нелинейности относительной фазочастотной характеристики канала исследуемой аппаратуры [252–266, 278–281].

Созданный «Измеритель динамических характеристик» является дальнейшим развитием идей, положенных в основу первых вариантов аналогичного прибора [145, 146].

Функциональная схема разработанного средства измерений приведена на рис. 2.15 для дискретного и на рис. 3.6 — для аналогового слежения за колебаниями времени запаздывания воспроизведенного с канала АМЗ испытательного сигнала, а внешний его вид показан на рис. 3.7.

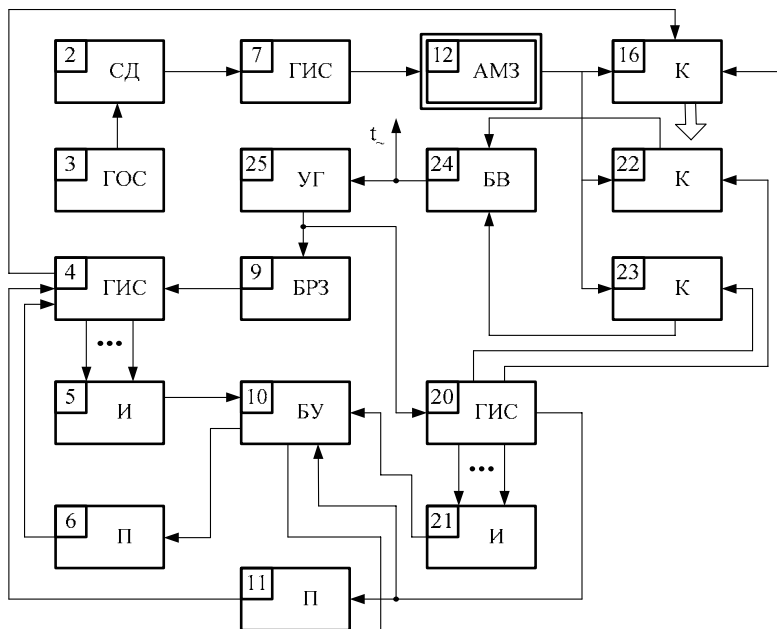


Рис. 3.6. Функциональная схема «Измерителя динамических характеристик» с аналоговым слежением за колебаниями времени запаздывания воспроизводимого сигнала:

СД 2 — счетчиковый делитель; ГОС 3 — генератор опорного сигнала;
 ГИС 4, ГИС 7, ГИС 20 — генератор испытательного псевдослучайного сигнала;
 И 5, И 21 — логическая схема «И»; П 6, П 11 — переключатель;
 БРЗ 9 — блок регулируемой задержки; БУ 10 — блок управления;
 АМЗ 12 — исследуемая аппаратура точной магнитной записи;
 К 16, К 22, К 23 — коррелометр; БВ 24 — блок вычитания;
 УГ 25 — управляемый генератор

«Измеритель динамических характеристик» представляет собой прибор настольного типа габаритами 325 × 220 × 280 мм. На лицевой панели расположены следующие органы управления: переключатели: «Интервал осреднения» и «Частота генератора, кГц», семь высокочастотных разъемов, шесть тумблеров, две кнопки, десять контрольных гнезд, органы регулировки «Подстройка синхронизации» и «Нуль интегратора», земляная клемма, три светодиода и индикаторная лампа включения питания. Прибор состоит из пяти плат с разъемами. В нем внедрены 7 изобретений [252–257, 271].

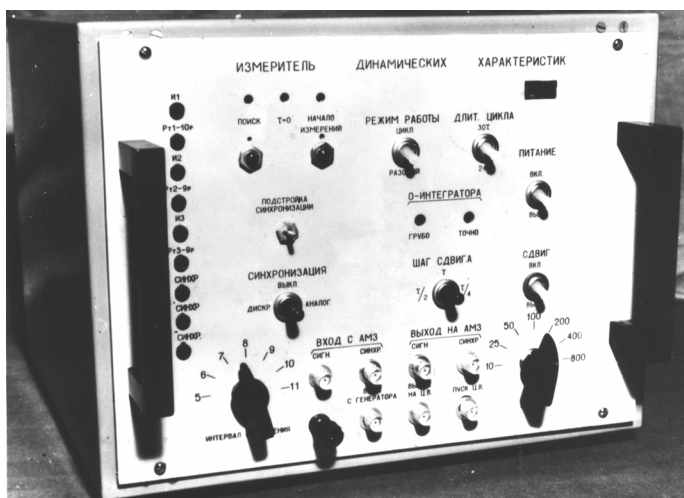


Рис. 3.7. Внешний вид «Измерителя динамических характеристик»

Работа прибора по функциональной схеме рис. 2.6 описана в п. 2.4. Особенности его работы по функциональной схеме рис. 3.6 заключаются в следующем. В режиме аналогового слежения за колебаниями времени запаздывания сигнала в канале АМЗ переключатель «Синхронизация», расположенный на лицевой панели прибора, ставится в положение «аналог». Воспроизведенный испытательный сигнал с выхода канала АМЗ 12 поступает на первые входы коррелометров К 16, К 22, К 23. Два последних вместе с блоком вычитания БВ 24 вырабатывают сигнал, пропорциональный величине и знаку временного рассогласования между воспроизведенным с канала АМЗ 12 испытательным сигналом и напряжением, вырабатываемым ГИС 20. Ко вторым входам коррелометров К 22 и К 23 подсоединены выходы 8-го и 10-го разрядов генератора М-последовательности ГИС 20 соответственно. Выходные сигналы этих коррелометров пропорциональны значениям взаимокорреляционной функции воспроизведенного сигнала и М-последовательности с выхода ГИС 20, вычисленным в точках, сдвинутых друг относительно друга на два периода импульсов сдвига ГИС 20. Разность этих сигналов является управляющим воздействием для управляемого генератора УГ 25, частота которого меняется в зависимости от величины и знака этого воздействия. Выходная последовательность импульсов с УГ 25 поступает в цепь сдвига ГИС 20 и через блок регулируемой задержки БРЗ 9 — в цепь сдвига генератора ГИС 4.

Таким образом, изменения временного масштаба воспроизведенного сигнала, вызванные колебаниями времени запаздывания, вызывают аналогичные изменения временного масштаба М-последовательностей, вырабатываемых генераторами ГИС 4 и ГИС 20.

Метрологические и технические характеристики созданного прибора исследовались по методике, разработанной в [145], и приведены в табл. 3.6. С использованием «Измерителя динамических характеристик» экспериментально определялись значения импульсных весовых функций измерительных каналов аппаратуры точной магнитной записи с лентопротяжным механизмом «Астра-В» и магнитографа 4 МИЗВ (табл. 3.2). В частности, для АМЗ с ЛПМ «Астра-В» получена ИВФ канала, приведенная на рис. 3.8.

Погрешность полученных значений ИВФ не превосходила 0,4 % при доверительной вероятности 0,9. По результатам этих измерений с использованием разработанного программного обеспечения проведено решение некорректно поставленной задачи вычисления передаточной функции из известных с погрешностью значений ИВФ с помощью преобразования Фурье на ЭВМ и получена аппроксимирующая дробно-рациональная функция минимального порядка

$$K(p) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i p^i}{\sum_{j=0}^n a_j p^j}. \quad (3.6)$$

Значения вычисленных коэффициентов a_j , b_i приведены в табл. 3.7.

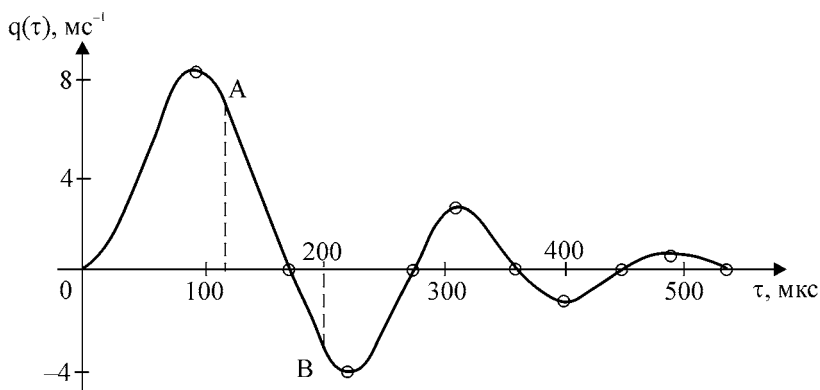


Рис. 3.8. Результаты экспериментального определения импульсной весовой функции канала АМЗ

Таблица 3.6

**Технические и метрологические характеристики
«Измерителя динамических характеристик»**

Характеристика	Область значений
Частота генератора опорного сигнала, кГц	800, 400, 200, 100, 50, 25, 10
Число разрядов регистра сдвига	10
Амплитуда М-последовательности (В)	От 0 до + 5
Входное сопротивление (кОм), не менее	100
Выходное сопротивление (кОм), не более	5
Предел допускаемой основной приведенной погрешности (%)	1
Режим работы	Циклический или разовый
Длительность цикла (τ)	24 или 30
Шаг сдвига (τ)	1, 1/2, 1/4
Интервал осреднения (τ)	От 5 до 11 через 1
Напряжение питания (В) от сети частотой (Гц)	220 (± 10 %) 50
Потребляемая мощность (Вт), не более	17
Время непрерывной работы (ч), не менее	8

Таблица 3.7

Значения коэффициентов аппроксимирующей передаточной функции (3.1.2.1) канала АМЗ, вычисленные по импульсной весовой функции

Индексы i, j	Коэффициенты	
	b_i	a_j
0	1,0000	1.3775
1	$-0,2974 \cdot 10^{-4}$	$0,1383 \cdot 10^{-3}$
2	$0,6470 \cdot 10^{-9}$	$0,7074 \cdot 10^{-8}$
3	$-0,6946 \cdot 10^{-14}$	$0,2100 \cdot 10^{-12}$
4	$0,5240 \cdot 10^{-19}$	$0,3957 \cdot 10^{-17}$
5	—	$0,4945 \cdot 10^{-22}$

Аппроксимирующая передаточная функция имеет пятый порядок и обеспечивает удовлетворительное приближение экспериментальных данных в полосе частот до 10 кГц. Этот факт является подтверждением тому, что по виду импульсной весовой функции реального канала можно быстро оценить порядок такой линейной системы, как половину суммы числа экстремумов ИВФ и пересечений ею оси абсцисс (кроме $t = 0$), принимая их за значения Марковских параметров. Действительно число этих точек, отмеченных на рис. 3.8 кружками, равно десяти, что соответствует системе пятого порядка.

«Измеритель нелинейности ФЧХ» создан на основе трех изобретений [259, 260, 262]. Функциональные схемы разработанного макета средства измерений в различных режимах его работы приведены на рис. 2.18 и рис. 2.19. Принцип действия прибора описан в п. 2.4 [263–265]. Внешний вид «Измерителя нелинейности ФЧХ» показан на рис. 3.9, а основные его технические и метрологические характеристики отражены в табл. 3.8.

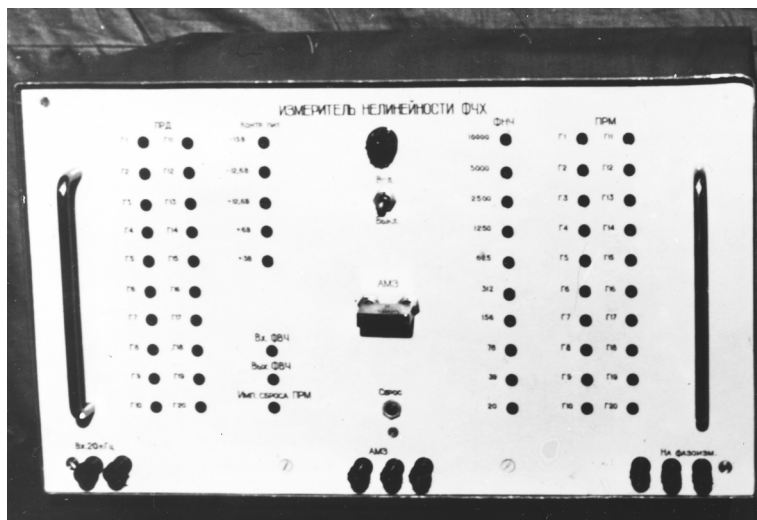


Рис. 3.9. Внешний вид измерителя нелинейности ФЧХ

Прибор представляет собой устройство настольного типа габаритами $350 \times 220 \times 400$ мм. На лицевой панели предусмотрены клеммы «Вх. 20 кГц» подключения внешнего задающего генератора синусои-

дальных колебаний частотой 20 кГц, клеммы «АМЗ» подключения входа и выхода измерительного канала исследуемой аппаратуры магнитной записи и клеммы «На фазоизм.» подключения внешнего фазометра или частотомера.

Таблица 3.8

**Технические и метрологические характеристики
«Измерителя нелинейности ФЧХ»**

Характеристика	Область значений
Частотный диапазон испытательного сигнала (Гц)	От 20 до 10 000
Частота внешнего задающего генератора синусоидального сигнала (кГц)	20
Число точек измерения фазо-частотной характеристики	10
Крутизна затухания фильтров верхних и нижних частот (дБ / на октаву), не менее	46
Амплитудный диапазон испытательного сигнала (В), не менее	3
Входное сопротивление (кОм), не менее	100
Выходное сопротивление (Ом), не более	500
Предел допускаемой абсолютной основной погрешности (угл. град.): для систематической составляющей	≈ 0 (с использованием режима самопроверки)
для случайной составляющей (среднее квадратическое отклонение)	
Предел допускаемой дополнительной погрешности (в долях от основной) при изменении напряжения питания в пределах от – 10 % до + 10 %	0,5
Время измерения 10 значений ФЧХ в автоматическом режиме (мин.), не более	5
Напряжение питания (В) от сети с частотой (Гц)	220 (± 10 %) 50
Потребляемая мощность (Вт), не более	40
Масса (кг), не более	7
Время непрерывной работы (ч), не менее	8

Кроме того, в левой части лицевой панели расположены 20 контрольных гнезд «ПРД» триггеров передающей части прибора, контрольные гнезда «Контр. пит.» блока питания, гнезда для контроля входного «Вх. ФВЧ» и выходного «Вых. ФВЧ» напряжений фильтра верхних частот, а также гнездо контроля импульса сброса приемной части прибора «Имп. сброса ПРМ». В правой части лицевой панели расположены 20 контрольных гнезд триггеров приемной части прибора «ПРМ», а также гнезда для контроля выходных напряжений фильтров нижних частот «ФНЧ» с частотой среза от 10 кГц до 20 Гц. В центральной части лицевой панели расположены тумблер и контрольная лампа включения питания «Вкл.», кнопка «Сброс» и двойной переключатель «АМЗ», позволяющий проводить самопроверку «Измерителя нелинейности ФЧХ», т. е. подключение передающей части прибора к приемной напрямую, минуя исследуемый канал АМЗ.

«Измеритель нелинейности ФЧХ» использовался для экспериментального определения значений нелинейности относительной фазо-частотной характеристики измерительных каналов «Устройства ввода данных в аппаратуру статистического анализа» типа КСИЧ, а также тракта магнитной записи–воспроизведения звука бытового магнитофона типа «Романтик» (табл. 3.2).

Последнее представляет интерес с той точки зрения, что фазо-частотные характеристики тракта бытовых магнитофонов практически не определялись, поскольку его качественные параметры (коэффициент паразитной и частотной модуляции, уровень шумов и нелинейных искажений и др.) значительно уступают параметрам аппаратуры точной магнитной записи, что затрудняет измерение значений ФЧХ магнитофонов. В то же время наметившаяся в стране тенденция использования модернизированных магнитофонов низкого класса точности в составе средств измерений (например, медико-биологического назначения) делает актуальной задачу определения ФЧХ их каналов.

На рис. 3.10 приведена экспериментально снятая зависимость нелинейности относительной фазо-частотной характеристики тракта магнитофона «Романтик». Следует отметить, что ее значения сильно зависят от положения органов регулировки тембров в низкочастотной и высокочастотной части рабочего диапазона частот. Приведенная зависимость получена при среднем положении обоих органов регулировки тембра.

Основные технические характеристики магнитофона типа «Романтик» приведены в табл. 3.9.

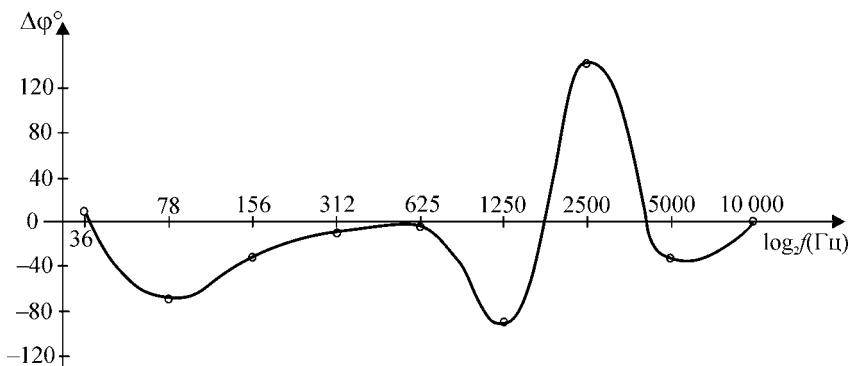


Рис. 3.10. Нелинейность относительной фазо-частотной характеристики тракта магнитной записи–воспроизведения магнитофона типа «Романтик-3»

Таблица 3.9

Основные технические характеристики магнитофона типа «Романтик»

Характеристика	Область значений
Скорость лентопротяжки (см/с)	9,53
Частотный диапазон (Гц)	63–12 500
Динамический диапазон на эквивалентном сопротивлении громкоговорителя (дБ), не хуже	42
Коэффициент нелинейных искажений при гармоническом сигнале 400 Гц (%), не более	5
Коэффициент детонации (%), не более	0,4

3.1.3. Установка для проверки информационно-измерительных систем

Образцовая «Установка для проверки информационно-измерительных систем» создана в 1981 году.

«Блок управления ГПС-2» этой установки выполняет следующие функции:

- сравнение мгновенных значений испытательного сигнала до и после прохождения им канала испытуемой аппаратуры;
- отслеживание текущего времени запаздывания испытательного сигнала в канале с выработкой (по изобретению [273]) напряжения, пропорционального его мгновенным значениям, а также синхронизация момен-

тов отсчета значений испытательного сигнала с выхода испытуемой аппаратуры;

– вывод аналоговых сигналов, пропорциональных погрешности преобразования мгновенных значений сигнала в амплитудной (ΔU) и временной (Δt) областях, а также преобразование их в цифровой код;

– выработка управляющих команд для всех блоков установки, и др.

Функциональная схема, поясняющая метод [274] измерения колебаний времени запаздывания сигнала в канале АМЗ, приведена на рис. 2.22, внешний вид установки показан на рис. 3.11, а основные технические и метрологические характеристики блока управления отражены в табл. 3.10. Сущность примененного метода измерений описана в п. 2.5.

Таблица 3.10

**Технические и метрологические характеристики
«Блока управления ГПС-2»**

Характеристика	Область значений
Частотный диапазон испытательного сигнала (кГц)	0–20; 0–10; 0–5; 0–2,5; 0–1,25; 0–0,625; 0–0,312
Число спектральных составляющих испытательного сигнала в рабочем диапазоне частот	1048575
Амплитудный диапазон (В)	± 1 ; ± 10 ; 0–(+1); 0–(+6)
Постоянное смещение испытательного сигнала (В)	0; + 0,5; + 3
Входное сопротивление (кОм), не менее для «пилот-сигнала» для испытательного сигнала	20 600
Выходное сопротивление (Ом), не более	200
Предел допускаемой основной приведенной погрешности (%)	1,6
Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности (%), не более	0,7
Напряжение питания (В) от сети (Гц)	220 (± 10 %) 50
Потребляемая мощность (Вт), не более	30
Масса (кг), не более	10
Габариты (мм)	480 × 350 × 220
Время непрерывной работы (ч), не менее	8



Рис. 3.11. Внешний вид «Установки для проверки информационно-измерительных систем», в состав которой входит «Блок управления ГПС-2»

«Блок управления ГПС-2» включает в себя шесть узлов кассетного типа, установленных на общей раме. Упомянутые узлы представляют собой две платы «логики», плату формирователей, АЦП, ЦАП и плату выделения временной ошибки. При испытаниях ИИС блок работает в двух режимах.

В режиме «Запись» в нем формируются испытательный и опорный сигналы, которые через выходные разъемы «Выход на АМЗ, I к., II к.» подаются на испытываемую ИИС.

В режиме «Воспроизведение» через входные разъемы «Вход с АМЗ, I к., II к.» в блок вводятся испытательный и опорный сигналы, прошедшие через испытываемую ИИС. Мгновенные значения этих сигналов сравниваются с соответствующими мгновенными значениями сигналов с ГПС-2, а полученные напряжения, пропорциональные погрешностям ΔU и Δt , через разъем «Выход на ЭВМ» выводятся на компьютер для дальнейшей обработки в соответствии с разработанным программным обеспечением и распечатки.

С помощью блока управления «Установки для поверки информационно-измерительных систем» исследованы, в частности, измерительные каналы аппаратуры точной магнитной записи типа М022-01 для получения закона распределения колебаний времени запаздывания сигналов в канале АМЗ.

Результаты исследования оформляются в виде распечатки, по которой можно построить гистограмму закона плотности вероятности распределения колебаний времени запаздывания. Кроме того, программное обеспечение позволяет выделить минимальное (Θ_{\min}) и максимальное (Θ_{\max}) время запаздывания в течение заданного интервала времени Δt и рассчитать оценки

$$\gamma_T = \frac{\Theta_{\max} - \Theta_{\min}}{T} \cdot 100 \%$$

и

$$\gamma_{\Delta t} = \frac{\Theta_{\max} - \Theta_{\min}}{\Delta t} \cdot 100 \%$$

максимального размаха колебаний времени запаздывания сигнала, приведенного к периоду T верхней граничной частоты полосы пропускания исследуемого канала и к выбранному (заданному) интервалу времени Δt .

3.2. Особенности разработанных средств измерений с магнитной записью—воспроизведением сигналов для применения в метрологической практике

Метрология, как наука об измерениях [152], нацелена на решение двудеиной задачи: во-первых, на создание методов и средств обеспечения единства измерений и, во-вторых, на разработку способов достижения требуемой точности. Применительно к аппаратуре точной магнитной записи первая часть задачи сводится к разработке научно-технических основ ее метрологического обеспечения, т. е., в конечном счете, — к созданию методов и средств поверки каналов АМЗ и исследования их метрологических характеристик, а вторая — к разработке способов повышения точности АМЗ, в частности — улучшения ее помехоустойчивости.

Глава II и п. 3.1 посвящены разработке методов и средств экспериментального определения метрологических характеристик измерительных каналов аналоговой аппаратуры точной магнитной записи, т. е. решают задачу обеспечения единства измерений при использовании АМЗ.

В п. 3.2 отражены результаты разработки измерительных преобразователей, основанных на использовании магнитной записи—воспроизведения и созданных для применения в государственных эталонах параметров движения.

При создании новых и совершенствовании существующих эталонов и образцовых средств воспроизведения и измерения параметров движения возникает задача создания высокоточной и широкодиапазонной системы измерения углов, угловых скоростей и ускорений в динамическом режиме. Наиболее актуальна эта задача при разработке эталонов единиц постоянного и гармонически изменяющегося линейного ускорения, воспроизводимого в процессе вращения одной или нескольких ротационных платформ [282, 283].

В созданных эталонных установках «Ротор» Государственного первичного эталона единицы постоянного линейного ускорения твердого тела в диапазоне 0,001–200 м/с² [284] и «Двойная центрифуга» Государственного специального эталона единиц перемещения, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот 0,5–10 Гц [285] использованы первичные измерительные преобразователи угла поворота в код, основанные на использовании принципов магнитной записи—воспроизведения информационных сигналов [286–292].

В упомянутых установках на цилиндрическую образующую магнитного барабана, жестко укрепленного на роторе каждой поворотной платформы, наносится сигналограмма, представляющая собой последова-

тельность магнитных меток, по частоте или периоду следования которых находится угловая скорость ротационной платформы.

Упрощенная схема эталонной установки «Ротор» приведена на рис. 3.12. В основу работы этой установки положены принцип создания центростремительного ускорения с использованием ротационной платформы (центрифуги) с вертикальной осью вращения [283].

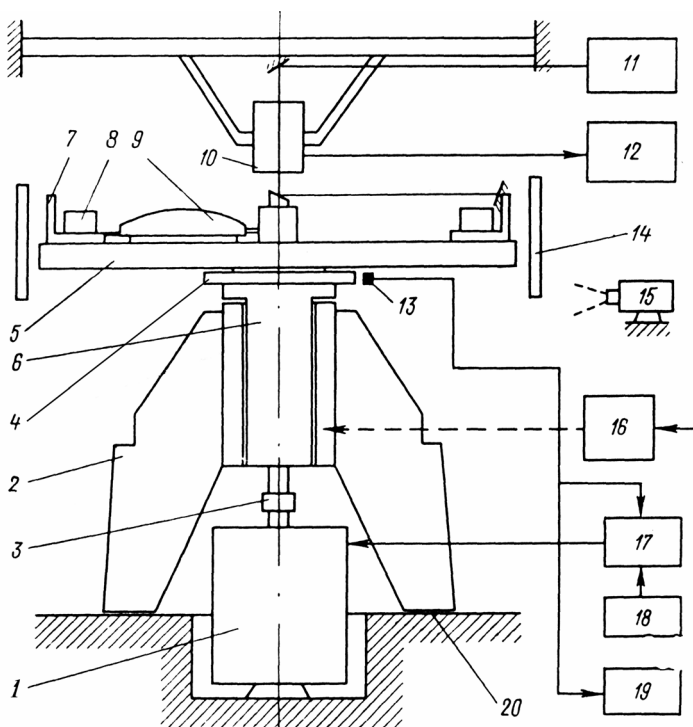


Рис. 3.12. Схема эталонной установки «Ротор»

- 1 — управляемый двигатель; 2 — станина; 3 — аэростатическая опора;
 4 — магнитный барабан; 5 — ротационная платформа; 8 — исследуемый акселерометр; 10 — ртутный токосъемник; 12 — измерительная система;
 13 — первичный измерительный преобразователь угла поворота в код с использованием магнитной записи-воспроизведения;
 17 — система фазового регулирования скорости электродвигателя;
 18 — опорный генератор стабильной частоты; 19 — двухканальная система измерений угловой скорости платформы

Воспроизводимое установкой ускорение

$$a = \omega^2 \cdot R \quad (3.7)$$

зависит от расстояния R от оси вращения до места установки исследуемого акселерометра и от угловой скорости вращения ω центрифуги. Для задания, стабилизации и измерения угловой скорости в установке предусмотрена система, включающая магнитный барабан 4, первичный измерительный преобразователь угла поворота в код 13 и система 17 фазового регулирования скорости электродвигателя 1. Шкала магнитного барабана, содержащая 8192 равноотстоящих по углу меток, наносится с использованием кольцевого оптического квантового генератора и обеспечивает воспроизведение угловой шкалы с ценой деления 2,6 угловых минут при погрешности около одной угловой секунды. Как показали результаты исследования метрологических характеристик эталонной установки «Ротор» [283], система задания и поддержания угловой скорости вращения, являющаяся замкнутой астатической системой фазового регулирования, обеспечивает воспроизведение средних за один оборот угловых скоростей в диапазоне от 1 до 10 рад/с со средним квадратическим отклонением результата измерения менее $5 \cdot 10^{-6}$.

Упрощенная схема эталонной установки «Двойная центрифуга» ДЦ-1 показана на рис. 3.13.

Она предназначена для воспроизведения и хранения единицы ускорения и передачи размера единицы (методом прямых измерений) образцовым и прецизионным рабочим акселерометрам, применяемым в хозяйстве страны.

Установка обеспечивает воспроизведение единицы линейного ускорения: при задании постоянных ускорений от 10 до 100 м/с²; при задании гармонических ускорений с амплитудой 10–100 м/с² на любой частоте в диапазоне от 0,5 до 30 Гц; при одновременном задании гармонических ускорений с теми же параметрами и постоянных ускорений до 200 м/с². Единица ускорения воспроизводится со средним квадратическим отклонением результата измерения, не превышающим $1 \cdot 10^{-3}$ при 10 независимых наблюдениях, и неисключенным остатком систематической погрешности, не превышающим $2 \cdot 10^{-3}$.

Для воспроизведения единицы ускорения используется двойная центрифуга (рис. 3.13) с независимым приводом поворотного стола 27, установленном на аэростатической опоре в роторе 8. При вращении ротора и при неподвижном столе воспроизводимое постоянное ускорение

$$a = \Omega^2 \cdot (R \pm r), \quad (3.8)$$

где: Ω — угловая скорость вращения ротора 8; R — расстояние между осями вращения платформ 8 и 27; r — расстояние от оси вращения стола 27 до исследуемого акселерометра 23.

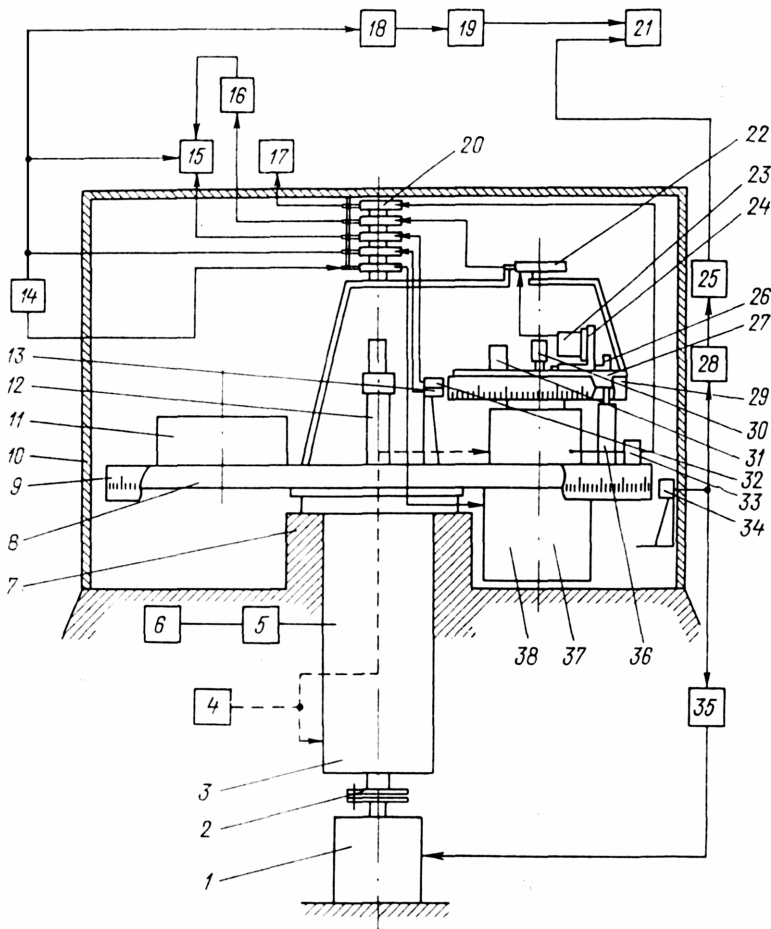


Рис. 3.13. Схема эталонной установки «Двойная центрифуга» ДЦ-1:

- 1 — электродвигатель ротора; 2 — аэростатическая опора ротора;
- 7 — станина; 8 — магнитный барабан ротора;
- 15 — блок измерения сдвига фазы; 16 — формирователь стоп-импульса;
- 18, 28 — счетчиковый делитель; 19, 25 — частотомер;
- 21 — регистрирующее устройство; 23 — исследуемый акселерометр;
- 27 — магнитный барабан поворотного стола; 29 — считывающее устройство поворотного стола; 33 — система управления электродвигателя поворотного стола; 34 — считывающее устройство ротора;
- 35 — система управления электродвигателя ротора;
- 37, 38 — электродвигатель и аэростатическая опора поворотного стола

При одновременном вращении платформ ускорение

$$a(t) = \Omega^2 \cdot R \cdot \cos \omega t + (\Omega + \omega)^2 \cdot r, \quad (3.9)$$

где: ω — угловая скорость вращения стола 16.

Значения угловых скоростей ротора и поворотного стола вычисляют по результатам многократных измерений времени поворота платформы на заданный угол. Измерительная система состоит из двух каналов, идентичных по принципу действия. В каналы измерения Ω и ω входят первичные измерительные преобразователи угла поворота ротора и стола, счетчиковые делители 18 и 28 и частотомеры 19 и 25. Каждый преобразователь состоит из магнитного барабана и считывающего устройства. Барабан 8 жестко связан с ротором, барабан 27 — со столом. Считывающие устройства 29 и 34 установлены на станине 7 и роторе. На каждый барабан наносится от кольцевого оптического квантового генератора сигналограмма, представляющая собой последовательность магнитных меток с постоянным углом φ_0 между соседними метками.

При вращении платформы сигнал со считывающего устройства поступает через делитель на вход частотомера, работающего в режиме измерения периода. Результаты измерения интервала времени T между импульсами с выхода делителя вводятся в регистрирующее устройство 21. Угловые скорости Ω и ω определяются по формуле $k\varphi_0/T$, где k — коэффициент деления соответствующего делителя.

Сигналы с преобразователей 8, 27, 29, 34 поступают также в системы управления 33, 35 электроприводами соответствующих платформ и используются в этих системах в качестве сигналов обратной связи при стабилизации угловой скорости.

В момент перехода ускорения через нуль магнитная метка, нанесенная предварительно на одну из дорожек барабана 27, проходит мимо считывающего устройства 29, сигнал которого включает блок измерения сдвига фазы 15. Измерение завершается в момент поступления на второй управляющий вход блока 15 стоп-импульса, сформированного формирователем 16 при прохождении через нуль сигнала исследуемого акселерометра 23. Блок 15 обеспечивает определение угла сдвига фазы двумя способами — преобразователем во временной интервал и методом прямых измерений.

Результаты проведенных исследований метрологических характеристик магнитных преобразователей угла поворота показали [293, 294], что при измерении средней угловой скорости на один оборот платформы систематическая составляющая погрешности не превышает $2 \cdot 10^{-6}$, а случайная составляющая погрешности практически не зависит от номи-

нального значения угла и существенно зависит от угловой скорости лишь в области $\Omega < 3$ рад/с.

Возрастание погрешности преобразования при уменьшении угловой скорости обусловлено, в частности, применением индукционных магнитных головок в устройствах считывания, амплитуда сигнала с которых пропорциональна линейной скорости перемещения магнитного носителя (барабана) относительно рабочего зазора головок. С уменьшением этой скорости амплитуда сигнала также уменьшается и соотношение сигнал/помеха ухудшается.

Опыт эксплуатации созданных магнитных преобразователей угла поворота в код с использованием магнитной записи–воспроизведения показал [290], что основными проблемами, возникающими при создании таких преобразователей, являются:

- обеспечение позиционного цифрового съема информации, включающее потокочувствительное воспроизведение, сканирование и выбор структуры магнитной шкалы;

- повышение точности и помехоустойчивости преобразователя за счет уменьшения влияния аддитивных и мультипликативных помех, интерференции символов кода, а также обнаружение и исправление ошибок при воспроизведении;

- расширение частотного диапазона преобразования;

- оптимизация конструкции магнитной головки и повышение долговечности системы головка–магнитный носитель.

Для решения задачи потокочувствительного воспроизведения записанной информации проведено исследование [287] новой тактированной потокочувствительной магнитной головки (ПМГ) с использованием принципов построения быстродействующих феррит-ферритовых элементов: разнополярного представления двоичных символов, динамического смещения, активизации потока дросселя, полезного использования обратного движения информации и двуполярного тактового питания, в предположении, что кривую перемагничивания магнитных сердечников допускается аппроксимировать суперпозицией ее линейных участков.

Результаты исследования показали, что такая ПМГ обладает большой устойчивостью к воздействию влияния окружающей среды и работоспособна в температурном диапазоне ± 70 °С при пятнадцати-процентном разбросе параметров сердечников балансных пар тактированного магнитного усилителя [287, 289]. Повышение помехоустойчивости прецизионных магнитных угловых преобразователей может быть обеспечено применением активного экранирования, основанного на создании компенсирующего сигнала [288].

Чувствительность ПМГ ограничивается тепловыми шумами и шумами Баркгаузена и выгодно отличается от головок, использующих индукционный эффект Фарадея [292]. Абсолютное значение считываемого магнитного потока составляет 10^{-11} Вб, что обеспечивает линейную плотность записи 50–100 имп./мм.

Быстродействие ПМГ зависит от многих факторов, среди которых определяющими являются величина неконтакта, коэффициент потерь в сердечниках и вид перепада намагниченности. Частотный диапазон головки составляет 0–10 кГц.

Мощность, потребляемая потокочувствительной магнитной головкой, пропорциональна ее быстродействию и чувствительности и снижается до нескольких десятков милливольт заменой ферритовых сердечников балансных пар тактированного магнитного усилителя пермаллоевыми сердечниками толщиной 0,02 мм, изготовленными электролитическим способом при печатном нанесении обмоток усилителя.

При выборе структуры магнитной шкалы основной задачей является выбор используемого кода. Сравнение характеристик различных кодов: двоичного, Баркера, Грея, кодов в системе остаточных классов, комбинированного и однопеременного кольцевого — показывает [295], что наибольшее помехозащищенное сжатие информации и уменьшение размеров датчика может быть достигнуто при использовании однопеременного кольцевого кода, формируемого с помощью неприводимого многочлена (в частности, трехчлена)

$$S_n(x) = x^n + x^k + a_0 \quad (3.10)$$

над полем Галуа $GF(p^n)$, где: n — длина кода, p — основание кода, a_0 — одно из значений алфавита ($a_0 \neq 0$), $1 \leq k \leq n$.

Неприводимый полином формирует кодовую последовательность L длиной $p^n - 1$. При этом чем больше основание кода p , тем меньше необходимая область сканирования, поскольку n рядом расположенных символов кольцевого кода однозначно определяют угловое положение объекта (платформы). Сложность технической реализации многоустойчивого магнитного носителя [291] ограничивает выбор значения p из ряда простых чисел от 2 до 11.

При ограниченных размерах магнитной шкалы для достижения высокой разрешающей способности преобразователя символы кодовой шкалы наносятся с большой плотностью (более 100 периодов на 1 мм). Межсимвольная интерференция, аддитивные и мультипликативные помехи различного происхождения приводят к появлению ошибок при воспроизведении символов. Использование дублированной синхронизированной

противофазной записи кода, а также сканирование как по строке (дорожке), так и по столбцу, обеспечивают возможность обнаружения и исправления ошибок любой кратности при решении системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (p - a_0) \cdot a_{i+n} [+](p - 1) \cdot a_{i+n-k} [+] a_i = 0 \\ a_m [+]\overline{a_m} [+] 1 = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.11)$$

где: a_m — символ прямого кода на одной дорожке; $\overline{a_m}$ — символ обратного кода на другой дорожке; a_0 и k — параметры $S_n(x)$;

$$i = q + m - 1,$$

где: q — коэффициент кратности ($q = 1, \dots, n$; $m = 1, \dots, n$); $[+]$ — знак суммирования по модулю p .

Как отмечалось выше, частотный диапазон работ ПМГ составляет от 0 до 10 кГц. Следует отметить, что расширение частотного диапазона тактированных потокочувствительных магнитных головок может быть расширен в сторону увеличения до 40 кГц при использовании сердечников типа М 0,27 В — $1 \times 0,7 \times 0,35$ (и менее). Дальнейшее увеличение частотного диапазона вплоть до 1 МГц обеспечивается переключением ПМГ в режим индукционной работы.

По мере возрастания скорости движения носителя увеличивается и скорость износа системы магнитная головка-носитель. В связи с этим важной задачей является предотвращение уменьшения метрологической надежности преобразователя вследствие износа системы.

Основное влияние на процесс изнашивания оказывают возникновение и нарушение фрикционных связей, имеющих двойственную молекулярно-механическую природу, таких как: упругое или пластическое отеснение материала, его микрорезание, разрушение защитных пленок или рабочего слоя носителя. Согласно кумулятивной теории износа главной причиной разрушения рабочего слоя являются усталостные трещины и отделение микроскопических чешуек материала или его окислов.

Как показали проведенные исследования, для обеспечения упругопластического контакта перспективно применение магнитного носителя на основе термопластической полиуретановой резины. Поверхность такого носителя обладает хорошей адгезией и позволяет наносить магнитный слой как электрохимическим способом, так и методами химического восстановления и напыления. Кроме того, при определенном способе изготовления могут быть получены кольца магнитной резины. При проведении исследований такие кольца надевались на барабан, нагрывались до

температуры пластичности (353 К), подвергались виброобработке гладким роликом с цилиндрической поверхностью 14-го класса шероховатости и охлаждались. Полученный таким способом носитель отличается высокой износостойкостью и сохраняет цилиндричность своей поверхности при температурах от 233 до 323 К. При виброобработке рабочей поверхности барабана в штатных опорах существенно уменьшается погрешность, обусловленная эксцентриситетом. В зависимости от структуры магнитной поверхности полиуретановый носитель может применяться для продольного, перпендикулярного или комбинированного намагничивания носителя.

На рис. 3.14 приведен один из вариантов цифрового магнитного преобразователя угла поворота в код с намагничиванием носителя перпендикулярным способом, работающий по алгоритму $S_n(x) + x + 3$; $p = 11$. На магнитном носителе 9 по дорожке 10 записаны символы a_m , по дорожке 11 — $\overline{a_m}$, по дорожке 12 нанесены синхрометки, переход которых с участка «0» на участок «1» и обратно расположен посередине символов a_m и $\overline{a_m}$ и соответствуют положению маркера. Сигналы с головок через усилители 13–15 и регистр сдвига 16 по каналу связи 17 поступают в цифровое вычислительное устройство 18, в котором угол, угловая скорость и угловое ускорение определяются по формулам:

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_i - h_\varphi \cdot \tau & \text{при } \varepsilon \leq 0 \\ \varphi_i - h_\varphi \cdot q & \text{при } \varepsilon > 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_2 - t_1}, \quad (3.13)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1}{t_2 - t_1}, \quad (3.14)$$

где: τ и q — текущий сдвиг головок относительно маркера; $\varepsilon = \tau - q$; h_φ — угловое перемещение ротора за такт работы ПМГ; φ_i — значение угла, определяемое по цифровой магнитной шкале; $\varphi_1, \varphi_2, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ — значения угла и его производной в моменты времени t_1 и t_2 .

Поскольку временные интервалы τ , q и $\Delta t = t_2 - t_1$ могут быть измерены с высокой точностью, то погрешность измерения φ , $\dot{\varphi}$ (и при необходимости $\ddot{\varphi}$) определяется погрешностью измерения углового положения φ_i объекта.

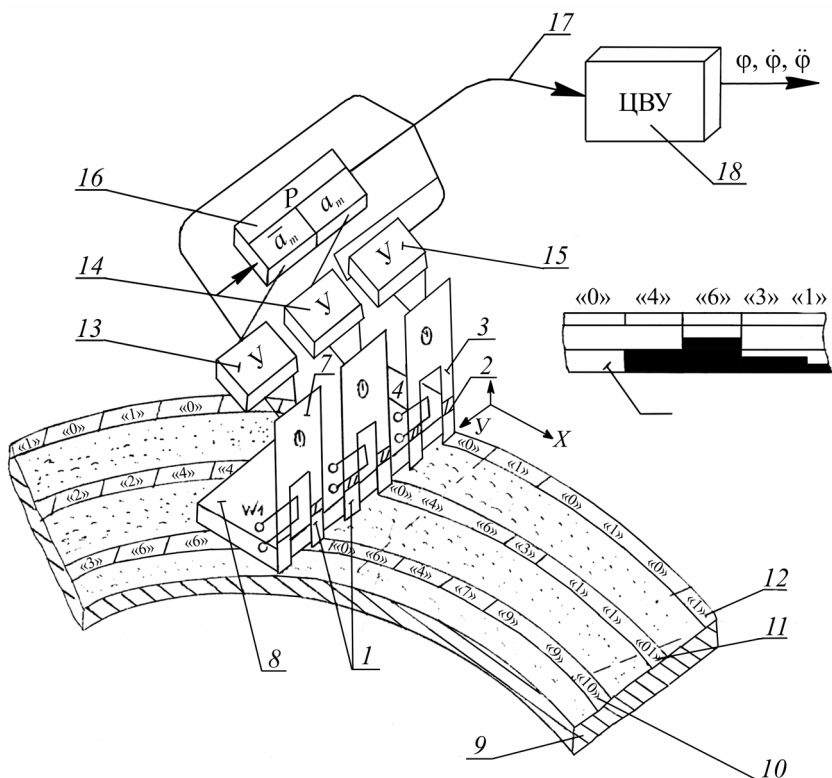


Рис. 3.14. Цифровой магнитный угловой преобразователь
 1 — полюс магнитной головки; 2 — магнитный переход; 3 — магнитопровод;
 4 — обмотка записи w_1 ; 7 — тактированный потокочувствительный элемент;
 8 — пьезоэлектрический вибратор; 9 — магнитный носитель;
 10, 11 — дорожки записи кода; 12 — дорожка записи синхрометок;
 13, 14, 15 — тактированный магнитный усилитель; 16 — регистр сдвига;
 17 — канал связи; 18 — цифровое вычислительное устройство

Комплексное решение перечисленных проблем и использование приведенных технических решений создает основу для уменьшения погрешностей измерения углов до долей угловых секунд при создании эталонов единиц параметров движения нового поколения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований осуществлено теоретическое обобщение работ, направленных на определение метрологических характеристик аппаратуры точной магнитной записи аналоговых электрических сигналов, используемой в составе измерительных информационных систем и измерительно-вычислительных комплексов.

На основе этого обобщения развиты новые подходы к созданию методов и средств измерения метрологических характеристик АМЗ.

Полученные результаты дают основу для решения проблемы метрологического обеспечения аппаратуры точной магнитной записи, имеющей важное значение в связи с широким применением АМЗ в составе ИИС и ИВК различного назначения.

В рамках решения этой проблемы и вытекающих из нее конкретных задач получены следующие результаты.

Разработан алгоритм оценки качества систем метрологического обеспечения в условиях неполных и неточных данных о ее элементах, связях и свойствах с использованием теории нечетких множеств, проиллюстрированный на примере проекта поверочной схемы для аппаратуры точной магнитной записи.

С учетом метрологического статуса АМЗ, как промежуточного измерительного преобразователя, и на основе анализа уравнения связи между входным и выходным сигналами ее измерительного канала выявлен комплекс ее метрологических характеристик, подлежащих нормированию и включающих в себя погрешность передачи сигнала по каналу, динамические характеристики в виде передаточной или импульсной весовой функции, уровень нелинейных искажений и колебания времени запаздывания сигнала, а также обоснована метрологическая модель образования результирующей погрешности регистрации сигнала.

Предложен способ нормирования динамических характеристик измерительного канала с использованием Марковских параметров, являющийся альтернативным и эквивалентным способу с применением моментов импульсных весовых функций, а также метод построения функциональных зависимостей для совместно измеряемых величин при неполных

исходных данных, основанный на решении задачи многокритериальной оптимизации.

Впервые в мировой практике разработан метод экспериментального оценивания погрешности регистрации сигнала в канале АМЗ, базирующийся на использовании особенностей испытательного сигнала в виде псевдослучайной двоичной последовательности максимальной длины, ограниченного по спектру в соответствии с полосой пропускания исследуемого канала.

Созданы корреляционные методы и средства прямых и дифференциальных измерений значений импульсных весовых функций канала АМЗ, учитывающие следующие особенности поверяемой аппаратуры: число каналов, ширину их полосы пропускания, различную временную последовательность режимов записи и воспроизведения, наличие транспонирования скорости движения магнитного носителя и возможность выделения сигнала, пропорционального колебаниям времени запаздывания. Исследован новый метод когерентных частот для экспериментального определения нелинейности фазо-частотных характеристик каналов АМЗ.

Разработаны корреляционный метод измерения нелинейных искажений сигнала типа «белого шума» в канале АМЗ, основанный на определении импульсных весовых функций канала на большом и малом уровне испытательного сигнала, а также методы и средства измерения колебаний времени запаздывания сигнала в канале, позволяющие оценить как колебания, так и дрейф времени запаздывания.

Предложены различные варианты технической реализации средств измерения метрологических характеристик АМЗ, новизна которых подтверждена 19 авторскими свидетельствами на изобретение.

Созданы восемь видов средств измерений для экспериментального определения метрологических характеристик аппаратуры точной магнитной записи, обеспечивающих ее поверку, а также средств измерений с магнитной записью–воспроизведением электрических сигналов, примененных в Государственных эталонах параметров движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Магнитная запись звука / Сб. переводных материалов. Составитель и редактор В.А. Бургов. М.: Искусство, 1956. 398 с.
2. Физические основы магнитной записи звука / А.И. Парфентьев, Л.А. Пуссэгт. М.: ГИТТЛ, 1957. 323 с.
3. Применение магнитной записи / А.Ф. Иоффе. М. - Л.: ГЭИ, 1959. 140 с.
4. Техника магнитной записи / Пер. с нем. под ред. М.А. Розенבלата. М.: Изд-во иностр. литературы, 1962. 515 с.
5. Магнитная запись / Пер. с англ. и нем. под ред. В.Г. Королькова. М.: Мир, 1966. 356 с.
6. Физика магнитной записи / Ч. Ми. М.: Энергия, 1967. 248 с.
7. Теория и техника магнитной записи / Пер. с нем., англ. и яп. под ред. В.Г. Королькова. М.: Мир, 1968. 293 с.
8. Физические основы магнитной звукозаписи / А.А. Вроблевский, В.Г. Корольков, А.Я. Мазо и др. М.: Энергия, 1970. 424 с.
9. Физика магнитной звукозаписи / В.А. Бургов. М.: Искусство, 1973. 496 с.
10. Теория фонограмм / В.А. Бургов. М.: Искусство, 1984. 302 с.
11. Методика лабораторных испытаний магнитофонов / Д.П. Василевский // Труды ВНИИРТ, 1964. № 2 (12). С. 31-49.
12. Испытания магнитофонов / В.Г. Корольков. М.: Энергия, 1965. 68 с.
13. Исследование фазовых искажений в аппаратуре магнитной записи звука кинофильмов / А.С. Закс: - Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., 1971. 26 с.
14. Измерения в аппаратуре записи и воспроизведения звука кинофильмов / Ю.М. Ишуткин, В.В. Раковский. М.: Искусство, 1985. 255 с.
15. Разработка теории модуляционного анализа-синтеза звуковых сигналов и ее практическое применение в технике записи звука кинофильмов / Ю.М. Ишуткин: Автореф. дисс. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. М. 1985. 47 с.

16. ГОСТ 24863–81. Магнитофоны бытовые. Общие технические условия и методы измерения. М.: Изд-во стандартов, 1981.
17. ГОСТ 12416–81. Магнитофоны. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1981.
18. Магнитная запись в вычислительной технике / П.П. Сыпчук, Ф.Ф. Гулин и др. М.: ЦНИИКА, 1958. 124 с.
19. Блоки регулируемого запаздывания / С.А. Догановский, В.А. Иванов. М. - Л.: ГЭИ, 1960. 63 с.
20. Магнитная запись в автоматике / В.Н. Шадрин. М. - Л.: ГЭИ, 1962. 120 с.
21. Схемы запоминания напряжений и блоки запаздывания / В.Н. Жовинский. М. - Л.: ГЭИ, 1963. 80 с.
22. Магнитная запись телевизионных изображений / В.И. Лазарев, В.И. Пархоменко. М. - Л.: ГЭИ, 1963. 88 с.
23. Магнитная сейсмическая запись / А.Н. Федоренко. М.: Недра, 1964. 146 с.
24. Фазовое управление с магнитной ленты / В.Н. Шадрин. М. - Л.: Энергия, 1964. 88 с.
25. Повышение плотности записи на магнитный носитель в вычислительных машинах / Э. Хопнер. М.: Энергия, 1965. 88 с.
26. Методы и аппаратура для регистрации быстропеременных величин / Сб. статей. М.: ОНТИприбор, 1966. 200 с.
27. Магнитная запись электрических сигналов. По материалам иностранной периодической печати / Пер. А.И. Вичеса. М.: Энергия, 1967. 280 с.
28. Некоторые вопросы применения аналоговой магнитной записи при промыслово-геофизических исследованиях скважин / В.Б. Минухин. – Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: ВНИИГеофизика, 1967. 19 с.
29. Цифровая магнитная запись / А. Хогленд. Перевод с англ. под ред. О.П. Васильева. М.: Сов. радио, 1967. 280 с.
30. Применение точной магнитной записи / Г.Л. Дэвис. М.: Энергия, 1967. 288 с.
31. Бортовые запоминающие устройства ракет и самолетов США / Р.М. Беляев // Зарубежная радиоэлектроника, 1967. № 12. С. 106–117.
32. Применение магнитной записи в промышленности / В.С. Екатеринин, А.А. Степанян. Куйбышев: Куйбышевское изд-во, 1968. 125 с.
33. Некоторые пути разработки высококачественных транспонированных спектров / О.В. Порицкий, О.А. Янушевский // Вестник КПИ, серия «Радиотехника и электроакустика», 1968. № 5. С. 181–187.

34. Запоминающие устройства большой емкости / В.М. Каган, В.И. Адасько, Р.Р. Пурэ. М.: Энергия, 1968. 320 с.
35. Магнитная запись в вычислительной технике / В.Г. Макурочкин. М.: Сов. радио, 1968. 176 с.
36. Устройства записи на магнитную ленту / С. Атей. М.: Энергия, 1969. 200 с.
37. Использование систем магнитной регистрации в технике измерений и передачи образцовых сигналов / А.Т. Дюжин, Ю.А. Махов // Измерительная техника, 1969. № 11. С. 5–6.
38. Техника магнитной видеозаписи / А.В. Гончаров, В.И. Лазарев, В.И. Пархоменко, А.Б. Штейн. М.: Энергия, 1970. 328 с.
39. Вопросы магнитной записи электрических сигналов / Сб. статей под ред. И.Е. Горона. М.: Связь, Вып. 1, 1970. 232 с.
40. Система магнитной записи с применением ОФМ / М.В. Гитлиц, Е.Е. Трестман, А.А. Деминский // Труды МЭИС, 1970, Вып. 1. С. 116–120.
41. Исследование и разработка аппаратуры аналоговой магнитной записи для сейсмометрии / А.А. Фридман. - Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: ИФЗ АН СССР, 1971. 22 с.
42. Лентопротяжные механизмы / А.В. Михневич. М.: Энергия, 1971. 87 с.
43. Некоторые вопросы магнитной записи сигналов, подлежащих спектральному анализу / В.А. Данилочкин. - Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: МЭИС, 1972. 15 с.
44. Преобразователи временного масштаба / В.М Черницер, Б.Г. Кадук. М.: Сов. радио, 1972. 143 с.
45. Анализ и вопросы проектирования систем точной магнитной записи с импульсной модуляцией / Н.Н. Слепов. - Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: ИПУ, 1973. 17 с.
46. Вопросы магнитной записи электрических сигналов / Сб. статей под ред. И.Е. Горона. М.: Связь, Вып. 2, 1973. 208 с.
47. Вопросы магнитной записи импульсов методами фазовой модуляции / Н.А. Корж. - Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Киев: КПИ, 1973. 26 с.
48. Точная магнитная запись / В.А. Аксенов, А.И. Вичес, М.В. Гитлиц. М.: Энергия, 1973. 280 с.
49. Некоторые вопросы магнитной ЧМ-записи фототелевизионных изображений / Ю.В. Скалин. - Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: МЭИС, 1974. 12 с.
50. Средства измерительной регистрирующей техники / М.С. Шкабард-ня, Н.В. Мартыненко // Тез. докл. IV Всесоюзной научно-тех-

- нической конференции по перспективным направлениям развития электроприборостроения. Л., 1975. С. 117–140.
51. Улучшение информационных характеристик магнитоленточных ЗУ / Рэтьюб // Электроника, 1975. № 9. С. 39.
 52. Механизмы аппаратуры магнитной записи / Е.Н. Травников. Киев: Техніка, 1976. 454 с.
 53. Магнитная запись в системах передачи информации / М.В. Гитлиц. М.: Связь, 1978. 304 с.
 54. Аппаратура точной магнитной записи с частотной модуляцией / Л.С. Гордеев, А.А. Фридман. М.: Энергия, 1978. 111 с.
 55. Современные измерительные магнитографы за рубежом / Экспресс-информация, ТС-5, Вып. 4. М.: ЦНИИТЭИприб., 1978. С. 1–23.
 56. Внешние ЗУ на магнитном носителе / В.А. Рыжков, Н.П. Сергеев, Б.М. Раков. М.: Энергия, 1978. 224 с.
 57. Автоматическое регулирование в магнитной записи / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов, В.С. Юрасов. Киев.: Техніка, 1979. 166 с.
 58. Справочник по технике магнитной записи / Под ред. О.В. Порицкого, Е.Н. Травникова. Киев.: Техніка, 1981. 319 с.
 59. Магнитная запись сигналов / М.В. Гитлиц. М.: Радио и связь, 1981. 161 с.
 60. Накопители информации с подвижным носителем / Е.П. Балашов, Д.Х. Атанасов. Л.: Энергоиздат, 1982. 206 с.
 61. Теоретические основы магнитной записи сигналов на движущийся носитель / М.В. Лауфер, И.А. Крыжановский. Киев.: Вища школа, 1982. 270 с.
 62. К вопросу о применении магнитных регистраторов в автоматизированных информационно-измерительных системах медико-биологического назначения / Г.В. Кашин, М.А. Развин. - В кн. Аппаратура и методы медицинского контроля: Материалы ПВсесоюзной научно-практической конференции // СКТБ Биофизприбор. Л.: Медицина, 1982. С. 239–241.
 63. Основы проектирования запоминающих устройств большой емкости / В.И. Адасько, Б.М. Коган, В.Б. Пац. М.: Энергоиздат, 1984. 284 с.
 64. Устройства магнитной записи / Р.У. Вуд // ТИИЭР, 1986, т. 74, № 1. С. 97–112.
 65. Ленты и диски в устройствах магнитной записи / Е.П. Котов, М.И. Руденко. М.: Радио и связь, 1986. 224 с.
 66. Специализированные магнитные регистраторы в системах вычислительной техники / К.М. Матус.: - Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., 1986. 184 с.

67. Цифровая магнитная запись в информационно-измерительной технике / Л.Л. Коваленков. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
68. Аппаратура точной магнитной записи / Л.С. Гордеев. М.: Радио и связь, 1989. 232 с.
69. Magnetic Recording in Science and Industry / Ch. Pear. - New York: Reichold Publishing Corp., 1967. 443 p.
70. Instrumentation Tape Recorders / L.L. Rosine // Electro-Technology, 1969, v. 83. N 4. P. 67–72.
71. Modern Instrumentation Tape Recording / EMJ Technology Inc. - England, 1978. 120 p.
72. L'enregistrement Magnetique d'Instrumentation / P. Moulin. - Paris: Radio, 1978. 416 p.
73. The next Decade in Magnetic Recording / J.C. Mallinson // IEEE Trans., 1985, v. M 21. N 16. P. 1217–1220.
74. Об измерительных информационных системах / Б.В. Карпюк, М.П. Цапенко // Автометрия, 1965. № 2. С. 18–25.
75. ГОСТ 8.009–84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1985.
76. ГОСТ 13699–80. Запись и воспроизведение информации. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1981.
77. Электрические измерительные преобразователи / Под ред. Р.Р. Харченко. М. - Л.: Энергия, 1967. 408 с.
78. Основы информационной теории измерительных устройств / П.В. Новицкий. Л.: Энергия, 1968. 248 с.
79. Линейные электрические преобразователи для измерительных приборов и систем / Л.И. Волгин. Л.: Сов. радио, 1971. 336 с.
80. Измерительная техника в проводной связи. Ч. III. Измерения параметров, характеризующих искажения сигналов связи / Н.Н. Соловьев. М.: Связь, 1971. 304 с.
81. ГОСТ 19654–74. Каналы передачи данных. Методы измерения параметров. М.: Изд-во стандартов, 1974.
82. Точность измерительных преобразователей / А.М. Азизов, А.Н. Гордов. Л.: Энергия, 1975. 256 с.
83. Введение в теорию точности измерительных систем / В.Я. Розенберг. М.: Сов. радио, 1975. 304 с.
84. Информационные измерительные системы / М. Краус, Э. Вошни. М.: Мир, 1975. 310 с.
85. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. М.: Изд-во стандартов, 1975. 336 с.

86. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. Киев.: Вища школа, 1983. 455 с.
87. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения / А.И. Мартяшин, Э.К. Шахов, В.П. Шляндин. М.: Энергия, 1976. 391 с.
88. Оценка и измерение искажений радиосигналов / Н.А. Рубичев. М.: Изд-во Сов. радио, 1978. 168 с.
89. 89. Теоретические основы информационной техники / Ф.Е. Темников. М.: Энергия, 1971. 424 с.
90. Электроизмерительные приборы с жидкостными чувствительными элементами / О.А. Мяздриков, Ю.В. Тарасов. Л.: Энергия, 1980. 104 с.
91. Измерительные преобразователи / А.С. Култышев. Горький: ГПИ, 1980. 89 с.
92. ГОСТ 8.438–81. Системы информационно-измерительные. Поверка. Общие положения. М.: Изд-во стандартов, 1981.
93. Электрические измерения физических величин. (Измерительные преобразователи) / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
94. Техника измерений и обеспечение качества. Справочная книга / Д. Хофманн. М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.
95. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1985. 248 с.
96. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений / Л.А. Семенов, Т.Н. Сирая. М.: Изд-во стандартов, 1986. 126 с.
97. Точность аналоговых линейных измерительных каналов ИИС / А.И. Заико. М.: Изд-во стандартов, 1987. 136 с.
98. Теория измерений для инженеров / Я. Пиотровский: Пер. с польск. М.: Мир, 1989. 335 с.
99. К вопросу о методике экспериментального определения фазовой характеристики тракта магнитной записи и воспроизведения измерительной информации / Р.Я. Сыропятова // Труды МЭИ, серия «Электротехника», 1964, Вып. 57. С. 201–213.
100. О помехоустойчивости методов магнитной записи с ШИМ / Р.М. Беляев // Радиотехника, 1966, № 10. С. 73–75.
101. К вопросу о помехоустойчивости систем магнитной записи / В.Б. Минухин // Радиотехника, 1967, № 12.
102. Метод измерений нелинейных искажений с помощью полос шума / В.М. Журавлев. Л.: ЦКБ киноаппаратуры, 1967. 164 с.

103. Об оценке искажений временного масштаба сигналами системами магнитной записи / Б.М. Степанов, В.Н. Филинов // Измерительная техника, 1968, № 10. С. 51–54.
104. О помехоустойчивости систем магнитной ШИМ-записи / Н.Н. Слепов. В кн.: Помехи в цифровой технике. Вильнюс, 1968. С. 71–74.
105. Измерение паразитных модуляций и обусловленных ими искажений в системах записи–воспроизведения звука / Ю.М. Ишуткин. Л.: ЛИКИ, 1969. 275 с.
106. О некоторых погрешностях анализаторов спектра с транспонированием / В.Г. Криксунов, Н.М. Тодосиенко // Изв. вузов, серия «Радиоэлектроника», 1969, Т. 12, № 7. – С. 653–659.
107. Методика расчета достоверности передачи импульсов по каналу магнитной записи / М.В. Гитлиц, А.Е. Ворожцов, В.Я. Горяев // Труды учебных институтов связи, 1969, Вып. 43. С. 160–164.
108. Оценка достоверности накопления цифровой информации в аппаратуре магнитной записи / В.И. Елкин, А.В. Назаренко, В.М. Сильянов // Вопросы радиоэлектроники, серия общетехническая, 1969, Вып. 20. С. 64–76.
109. Исследование погрешностей магнитографов с высокой информационной плотностью записи / Л.С. Гордеев. – Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: МЭИС, 1970. 19 с.
110. О фазовых искажениях в канале магнитной записи с высокочастотным подмагничиванием / В.Б. Минухин. Вопросы радиоэлектроники, серия XII «Общетехническая», 1970, Вып. 10. С. 19–31.
111. Измерение фазовой характеристики тракта магнитной записи–воспроизведения / А.Г. Сейлюс, Ю.А. Скудутис. - Труды научно-технической конференции по радиоэлектронике. Каунас, 1970, Т. 6. С. 287–292.
112. Измерение нелинейных искажений в аппаратуре магнитной записи / В.К. Железняк. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Киев, 1970. 21 с.
113. О методах измерения фазовых характеристик трактов магнитной записи–воспроизведения / Р.П. Ясинавичюс // Труды научно-технической конференции по радиоэлектронике. Каунас, 1970, Т. 6. С. 303–308.
114. Об искажениях сигналов в канале магнитной записи при колебаниях скорости носителя / В.Б. Минухин // Радиотехника, 1971, № 9. С. 74–82.
115. О влиянии искажений сигналов в канале магнитной записи на точность корреляционных измерений / А.А. Догадов // Труды Акустич. ин-та, 1971, Вып. XII. С. 54–61.

116. Электронные способы компенсации в устройствах точной магнитной записи / В.М. Черницер, Н.С. Петров, Ю.М. Князев // Труды Таганрогского радиотехнического института. Таганрог, 1972, Вып. 28, С. 22–30.
117. Оценка помехоустойчивости аналоговых методов магнитной записи / В.Н. Филинов, М.В. Гитлиц // Радиотехника, 1973, № 12. С. 74–76.
118. Контактные потери в системах магнитной записи / Ю.Л. Богородский // Техника кино и телевидения, 1973, № 4. С. 51–56.
119. Искажения сигнала при магнитной записи с частотной модуляцией / Л.С. Гордеев // Радиотехника, 1973, № 7. С. 77–81.
120. Разрешающая способность аппаратуры точной магнитной записи / И.Е. Рибель // Измерительная техника, 1973, № 7. С. 18–20.
121. Колебания скорости носителя в аппаратуре аналоговой магнитной записи / Е.В. Кушелев. - Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1973. 22 с.
122. Исследование некоторых искажений при магнитной видеозаписи / В.И. Щербина. - Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: МЭИС, 1974. 15 с.
123. Паразитная амплитудная модуляция в магнитной звукозаписи / И.М. Ишуткин, В.П. Лебедев // Киноаппаратура: Информ.-техн. об., 1975, № 8. С. 3–51.
124. Исследование помех в тракте магнитной записи–воспроизведения с помощью статистического моделирования / А.И. Вичес, В.А. Смирнов // Радиотехника, 1975, № 11. С. 75–84.
125. Об измерении статистических характеристик неравномерности скорости движения и перекоса магнитной ленты / А.А. Килна, Г.П. Вейверис, Р.Ю. Орлинис // Труды АН Лит. ССР, 1975, Б, № 1 (86). С. 115–121.
126. Исследование влияния нестабильности контакта на параметры выходного сигнала при магнитной записи с ВЧ подмагничиванием / А.И. Вичес, В.А. Смирнов // Радиотехника, 1977, № 1. С. 70–76.
127. Исследование структурного шума магнитной записи с ВЧП методом статистического моделирования / В.А. Смирнов // Радиотехника, 1977, № 10. С. 65–71.
128. Исследование контактных потерь при магнитной записи с высокочастотным подмагничиванием / А.И. Вичес, В.А. Смирнов // Радиотехника, 1977, № 2. С. 76–79.
129. Фазовые искажения при магнитной записи сигналов / А.И. Вичес, В.А. Смирнов // Радиотехника, 1978, № 6. С. 44–58.

130. ГОСТ 22755–77. Приборы для поверки измерителей колебаний и дрейфа скорости носителя магнитной записи. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1978.
131. Разрешающая способность систем магнитной записи / Ю.Л. Богородский, под ред. А.Ф. Богомолова. М.: Энергия, 1980. 112 с.
132. Измерение нестабильности скорости носителя записи / М.В. Лауфер. М.: Связь, 1980. 104 с.
133. ГОСТ 14127–81. Средства технические вычислительной техники. Накопители на магнитных лентах. Общие технические требования и методы испытания. М.: Изд-во стандартов, 1981.
134. Исследование и разработка методов оценки точности аналоговой магнитной записи / В.В. Солодеев. - Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: МЭИС, 1982. 22 с.
135. ГОСТ 22754–83. Аппаратура точной магнитной записи. Методы измерений колебаний и дрейфа скорости носителя записи. М.: Изд-во стандартов, 1983.
136. 136. Моделирование канала магнитной записи на ЭВМ / А.И. Вичес, А.И. Горон, В.А. Смирнов. Под ред. А.И. Вичеса. - М.: Радио и связь, 1984. 184 с.
137. Time Errors in Magnetic Recording / R.H. Prager // J. Audio Eng. Soc., 1959, v. 7, N 2. P. 81–88.
138. Time Displacement Errors in Instrumentation Tape Recording / G.H. Schultze // 1963 International Telemetry Conf., 1963, London. P. 263–272.
139. Reproduce System Noise in Wide - Band Magnetic Recording Systems / Ph. Smaller // IEEE Trans. on Magnet., 1965, v. Mag. 1, N4. P. 357–363.
140. The Effect of Flutter on a recorded Sinewave / S.C. Chao // Proc. IEEE, 1965, v. 53, N 7. P. 726–727.
141. Flutter and Time Errors in Instrumentation Magnetic Recording / S.C. Chao // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1966, v. AES-2, N 2. P. 214–222.
142. Standard IRIG, document 106-71, 106-73.
143. Reducing Distortion in Analog Tape Recorders / D. Creisinger // J. Audio Eng. Soc., 1975, v. 23, N 2. P. 107–112.
144. Аналитический обзор по научно-исследовательской работе «Разработка методики измерения неравномерности фазово-частотных характеристик сквозного канала аппаратуры магнитной записи–воспроизведения». Шифр «Фаза» / В. Свяченый, В. Ивасенко, Ю. Мошков. Киев: предприятие п/я А-7358, 1976. 69 с.
145. Разработка средств измерений для оценки метрологических характеристик аппаратуры магнитной записи и исследование методов по-

- вышения ее точности / В.А. Слаев. (Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук). Л.: ВНИИМ, 1973. 201 с.
146. Разработка методов и аппаратуры для определения динамических характеристик измерительных преобразователей непрерывных электрических сигналов / Б.А. Школьник. – Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л.: ВНИИМ, 1974. 23 с.
 147. Способ измерения импульсных характеристик тракта воспроизведения магнитной записи / А.И. Вичес. - А.с. № 236634. СССР // Открытия. Изобретения. 1969, № 31.
 148. Методы измерения нелинейных искажений сигналов в аппаратуре магнитной записи / В.К. Железняк. - Обзоры состояния отдельных вопросов радиоэлектроники, Вып. 63, 1968. 58 с.
 149. ГОСТ 1.25–76. Государственная система стандартизации. Метрологическое обеспечение. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1986.
 150. Применение системного подхода при разработке долгосрочных прогнозов и программ в области метрологии / Ю.В. Тарбеев, В.А. Балалаев, В.А. Слаев, В.С. Александров, В.Н. Романов // Тез. докл. III Всеакадемической школы по проблемам стандартизации и метрологии. Тбилиси, 1985. С. 18–22.
 151. Особенности разработки прогнозов в метрологии / Ю.В. Тарбеев, В.А. Слаев, В.Н. Романов, В.С. Александров // Тез. докл. III Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1986. С. 110–112.
 152. ГОСТ 16263–70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1970.
 153. Математика, измерения и психофизика / С.С. Стивенс. В кн.: Экспериментальная психология. М.: ИИЛ, 1960, Т. 1. С. 19–89.
 154. Основы теории измерений / П. Суппес, Дж. Зинес. В кн.: Психологические измерения. М.: Мир, 1967. С. 9–110.
 155. Психологические шкалы / Р. Льюис, Е. Галантер. В кн.: Психологические измерения. М.: Мир, 1967.
 156. Теория измерений / И. Пфанцагль. М.: Мир, 1976. 248 с.
 157. Развитие репрезентационной теории измерений / В.Г. Кнорринг. - Измерение, контроль, автоматизация, 1980, Вып. 11–12 (33– 34). С. 3–9.
 158. Принципы образования системы основных понятий метрологии / В.Н. Романов, В.А. Слаев // Тез. докл. Всесоюзного научно-технического семинара «Теоретические проблемы электрометрии». Тарту, 1985. С. 10–14.

159. Основы метрологии / М.Ф. Маликов. Часть первая. Учение об измерении. М.: Комитет по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1949. 479 с.
160. Счет и измерение / Г. Гельмгольц. Казань, Изд-во Казанского университета, 1893.
161. Об измерении величин / А. Лебег. М.: Учпедгиз, 1960. 204 с.
162. Основные понятия и представления теории измерений / В.М. Свириденко. В кн.: Гносеологические аспекты измерений. Киев: Наукова думка, 1968. 304 с.
163. Проблема точного измерения в связи с эволюцией понятия физической величины / В.М. Свириденко. В кн.: Гносеологические аспекты измерений. Киев: Наукова думка, 1968. С. 136–150.
164. Об основных понятиях метрологии / К.П. Широков // Труды метрологических институтов СССР, Вып. 130 (190). Л., 1971. С. 16–18.
165. Логико-гносеологический аспект проблемы точности измерений / В.М. Свириденко // Измерительная техника, 1971, № 5. С. 6–8.
166. Теория измерений / Ю.С. Старк. М., 1973. 58 с.
167. Содержание и задачи метрологии / П.Н. Агалецкий // Труды метрологических институтов СССР, Вып. 119 (179). М., 1974. С. 204–210.
168. Измерения и меры / Г.Д. Корнев. М., 1975. 129 с.
169. Введение в алгоритмическую теорию измерения / А.П. Стахов. М.: Сов. радио, 1977. 288 с.
170. Философские аспекты измерения в современной физике / Л.М. Гутнер. Л.: 1978. 136 с.
171. основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения. М. Изд-во стандартов, 1981.
172. Обзор основных проблем теоретической метрологии / Л.А. Семенов, В.А. Грановский, Т.Н. Сирая // Тез. докл. Всесоюзного семинара «Фундаментальные проблемы метрологии». Л., 1961. С. 13–23.
173. О формулировке постулатов теории измерений / В.А. Грановский, Л.И. Довбета // Материалы Всесоюзного семинара «Фундаментальные проблемы метрологии». Л., НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1981. С. 80–84.
174. Аксиоматические основы метризации / В.Я. Ложников // Тез. докл. II Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1983. С. 13–14.
175. Информационно-статистическая теория измерений / В.И. Соболев. М.: Машиностроение, 1983. 224 с.
176. Измерительно-вычислительные средства и формальная метрология / Э.И. Цветков // Измерительная техника. 1983, № 9. С. 25–28.

177. К определению основных целей измерения / М.П. Цапенко // Измерительная техника, 1983, № 5. С. 12–14.
178. О понятии «измерение» и его обобщениях / М.А. Земельман // Измерительная техника, 1985, № 2. С. 3–6.
179. К вопросу об основных понятиях метрологии / М.Ф. Юдин // Тез. докл. III Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1986. С. 7–8.
180. К основам теории измерений / П.П. Орнатский // Тез. докл. III Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1986. С. 33–34.
181. Содержание принципов теории измерений / В.А. Грановский, Л.М. Гутнер // В сб. науч. трудов НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» «Анализ и формализация измерительного эксперимента». Л.: Энергоатомиздат, 1986. С. 29–33.
182. Основы теории измерения величин / Э.И. Цветков, И.Н. Кротков // Тез. докл. III Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1986. С. 55–56.
183. Гносеологические основы исходных положений метрологии / В.А. Грановский, Л.И. Довбета, В.В. Лячев // Тез. докл. III Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1986. С. 15–16.
184. Основы теории статистических измерений / Э.И. Цветков. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
185. Философско-математические основы теории системных измерений / В.П. Стиблина // Тез. докл. III Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1986. С. 26–27.
186. Основные понятия и особенности системных измерений / А.Д. Пинчевский, А.Л. Семенюк // Тез. докл. III Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1986. С. 58–60.
187. Об основополагающих метрологических терминах «измерение», «контроль», «погрешность» — их определение и понимание / Н.Н. Марков // Тез. докл. III Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1986. С. 34–35.
188. Теоретическая метрология / И.Ф. Шишкин. Л., СЗПИ, 1983. 84 с.
189. Измерения. Понятия, теории, проблемы / К. Берка. М.: Прогресс, 1987. 318 с.
190. О соотношении понятий «измерение» и «измерение физической величины» / Л.И. Довбета, В.В. Лячев // Тез. докл. IV Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1989. С. 17–19.
191. Метрологическая терминология в системе понятий гносеотехники / В.Г. Кнорринг // Тез. докл. IV Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1989. С. 188–190.

192. Об основополагающих терминах в метрологии / Н.Н. Марков // Тез. докл. IV Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1989. С. 191–193.
193. Исследование и разработка новых методов измерения и воспроизведения напряжения инфразвуковых частот ниже 20 Гц / Е.Д. Колтик, В.И. Фоменко, О.Н. Гравин. (Отчет по научно-исследовательской работе 01.01.12.09). Л.: НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1983. 161 с.
194. Matematyczne podstawy metrologi / I. Jaworski. - Warszawa: Wydawnictwa Wokowo-Techniczne, 1979. 367 p.
195. Метрология в промышленности / В.И. Проненко, Р.В. Якирин. К.: Техніка, 1979. 223 с.
196. Основы теоретической метрологии / Л.И. Довбета, В.В. Лячев, Т.Н. Сирая. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. 292 с.
197. Системная метрология — метрологические системы и метрология систем / В.А. Грановский. СПб., 1999. 360 с.
198. The Principles of Mathematics / B. Russel. New York, Norton, 1937. 167 p.
199. Динамические измерения: основы метрологического обеспечения / В.А. Грановский. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 224 с.
200. Анализ структуры и сущности процесса измерений / В.А. Балалаев, В.А. Слаев, В.В. Скотников, В.И. Фоменко, В.С. Александров // Тез. докл. VI Всесоюзной научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». М., 1984. С. 63.
201. Общее описание процесса измерений / В.А. Балалаев // Измерительная техника, 1985, № 8. С. 3.
202. Проблемы описания и построения метрологических систем / В.А. Балалаев. - В сб. научных трудов НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» «Системные исследования в метрологии». Л., 1985. С. 31–40.
203. Принципы разработки классификатора видов измерений / В.А. Слаев // В сб. научных трудов НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» «Системные исследования в метрологии». Л., 1985. С. 41–63.
204. Достижения в области магнитной и оптической записи / Журнал института телеинженеров. Тематический выпуск. 1988.
205. Качество измерений: Метрологическая справочная книга / М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшова. Л.: Лениздат, 1987. 295 с.
206. ГОСТ 22851–77. Выбор номенклатуры показателей качества промышленной продукции. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1977.

207. Управление качеством продукции. Справочник. М.: Изд-во стандартов, 1985. 464 с.
208. Классификация многомерных наблюдений / С.А. Айвазян. М.: Статистика, 1974. 240 с.
209. Теория полезности для принятия решений / П. Фишборн. М.: Наука, 1978. 111 с.
210. Формализация понятия качества метрологических систем на основе нечетких множеств / В.Н. Романов, В.А. Слаев // Тез. докл. VII Всесоюзного симпозиума «Эффективность, качество и надежность систем «человек-техника», ч. 1 «Стандартизация и метрология». М.: 1984. С. 27.
211. Формализация понятия качества метрологических систем на основе нечетких множеств / В.Н. Романов, В.А. Слаев // Метрология. 1985. № 1. С. 11–17.
212. Обобщение задачи многоцелевой оптимизации систем на основе нечетких множеств / В.Н. Романов, В.А. Слаев // Метрология, 1985. № 12. С. 3–13.
213. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский. М.: Наука, 1981. 206 с.
214. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
215. Общая теория решеток / Г. Гретцер. М.: Мир, 1982. 452 с.
216. ГОСТ 8.027–89. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема единицы электродвижущей силы. М.: Изд-во стандартов, 1989.
217. ГОСТ 8.184–76. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема единицы напряжения 0,1–10 В в диапазоне частот $20\text{--}3\cdot 10^7$ Гц. М.: Изд-во стандартов, 1977.
218. ГОСТ 8.129–98. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон единиц времени (секунда), частоты и национальной шкалы времени. М.: Изд-во стандартов, 1998.
219. Теория оптимального эксперимента / В.В. Федоров. М.: Наука, 1971. 312 с.
220. Разработка последовательных методов планирования эксперимента / Руководитель НИР Г.К. Круг. - Отчет № Р001625 государственной регистрации, инв. № Б 287308, ч. III «Синтез оптимальных идентифицирующих сигналов». М.: МЭИ, 1973. 119 с.

221. Optimum estimation of impulse response in the presence of noise / M.J. Levin // IRE Trans. on Circuit Theory, v. CT-7, 1960. P. 50–56.
222. Моделирование случайных процессов на аналоговых и аналого-цифровых машинах / Г.А. Корн. М.: Мир, 1968. 315 с.
223. Теория и применение псевдослучайных сигналов / А.И. Алексеев, А.Г. Шереметьев, Г.И. Тузов и др. М.: Наука, 1969. 365 с.
224. Системы связи с шумоподобными сигналами / Н.Т. Петрович, М.К. Размахнин. М.: Сов. радио, 1969. 232 с.
225. Генерирование случайных сигналов / М.П. Бобнев. М.: Энергия, 1971. 240 с.
226. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / В.Б. Пестряков, В.П. Афанасьев, В.Л. Гурвиц и др. Под ред. В.Б. Пестрякова. М.: Сов. радио, 1973. 424 с.
227. К вопросу нормирования основной погрешности аппаратуры точной магнитной записи / В.А. Слаев, Г.П. Цивирко // Тез. докл. I Всесоюзной научно-технической конференции по теории и технике магнитной записи. Киев: КДНТП, 1969. С. 31–32.
228. Некоторые вопросы построения аппаратуры для оценки погрешностей систем многоканальной магнитной записи / Е.Д. Колтик, В.А. Слаев // Тез. докл. I Всесоюзной научно-технической конференции по теории и технике магнитной записи. Киев: КДНТП, 1969. С. 30–31.
229. Современное состояние и перспективы метрологических работ в области магнитной записи измерительной информации / А.К. Грольман, Е.Д. Колтик, В.А. Слаев, Г.П. Цивирко // Тез. докл. II Всесоюзной конференции по метрологии и измерительной технике, Тбилиси, 1971. С. 6–12.
230. Задачи метрологического обеспечения аппаратуры магнитной записи / В.А. Слаев // Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции «Перспективы развития техники магнитной записи и технологии производства магнитных носителей». Шостка, 1974. С. 62–64.
231. О методах нормирования метрологических характеристик измерительных устройств / М.А. Земельман, А.П. Кнюпфер, В.П. Кузнецов // Измерительная техника. 1969, № 1. С. 92–95; № 2. С. 90–93; № 3. С. 88–91.
232. Метрологические характеристики измерительных систем / В.П. Кузнецов. М.: Машиностроение, 1979.
233. Нормирование и определение метрологических характеристик средств измерений / М.А. Земельман, В.П. Кузнецов, Г.Н. Солопченко. М.: Машиностроение, 1980. 68 с.

234. Нормирование динамических характеристик линейных измерительных преобразователей / М.Д. Вайсбанд // Измерительная техника, 1974, № 1. С. 9–11.
235. Курс теории автоматического управления / А.А. Первозванский. М.: Наука, 1986. 616 с.
236. Теория линейных систем / Л. Заде, Ч. Дезоер. М.: Наука, 1986. 616 с.
237. Моделирование конечномерных систем. Моменты и марковские параметры: Учебное пособие / Л.А. Мироновский. Л.: ЛИАП, 1988. 78 с.
238. Теория потенциальной помехоустойчивости / В.А. Котельников. М.: Госэнергоиздат, 1956. 151 с.
239. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю.В. Линник. М.: Физматгиз, 1958. 334 с.
240. Построение функциональных зависимостей измеряемых величин при неполных исходных данных / В.А. Балалаев, В.Н. Романов, В.А. Слаев // Тез. докл. II Всесоюзного совещания по теоретической метрологии. Л., 1983. С. 47–48.
241. Построение функциональных зависимостей измеряемых величин при неполных исходных данных / В.А. Балалаев, В.Н. Романов, В.А. Слаев // Метрология. 1985, № 2. С. 8–13.
242. А.с. № 473125 СССР, МКИ G01r 29/00. Способ измерения искажений при магнитной записи и воспроизведении / В.П. Пиастро, В.А. Слаев, Г.П. Цивирко, Б.А. Школьник. № 1898072/18-10; заявлено 29.03.73; опубл. 05.06.75. - УДК 621.317.3(088.8) // Открытия. Изобретения. 1975, № 21. С. 120.
243. А.с. № 522513 СССР, МКИ G11b 5/00. Устройство для измерения искажений записываемых и воспроизводимых в аппаратуре магнитной записи сигналов / В.А. Слаев. - № 2071791/10; заявлено 04.11.74; опубл. 25.07.76. - УДК 534.852(088.8) // Открытия. Изобретения. 1976. № 27. С. 145.
244. О проверке аналоговой аппаратуры магнитной записи / В.А. Слаев // Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции «Повышение эффективности трактов магнитной записи–воспроизведения». Вильнюс, 1976. С. 3–5.
245. А.с. № 538310 СССР, МКИ G01R 29/00. Устройство для измерения искажений магнитной записи–воспроизведения / А.Н. Баранов, В.А. Слаев, А.И. Соболев. - № 2147706/10; заявлено 23.06.75; опубл. 05.12.76. - УДК 621.317.3(088.8) // Открытия. Изобретения. 1976. № 45. С. 167.
246. Метод определения погрешности регистрации сигналов аппаратурой точной магнитной записи / А.Н. Баранов, В.А. Слаев, А.И. Со-

- болев // Современные проблемы метрологии. М.: Атомиздат, 1977, Вып. 6. С. 28–29.
247. А.с. № 585539 СССР, МКИ G11B 31/00. Устройство для измерения искажений сигналов, регистрируемых многоканальной аппаратурой магнитной записи / В.А. Слаев, А.И. Соболев, А.Н. Баранов. - № 2379421/10-18; заявлено 02.07.76; опубл. 25.12.77. - УДК 534.852(088.8) // Открытия. Изобретения. 1977, № 47. С. 163–164.
248. Методы и средства измерения искажений аналоговых сигналов в аппаратуре магнитной записи / В.А. Слаев, А.И. Соболев, Е.Д. Колтик и др. // Тез. докл. II научно-технической конференции «Дальнейшее развитие теории и техники магнитной записи». М. – Киев: 1978. НТОРЭС им. А.С. Попова. С. 79.
249. Метод аттестации образцовых средств измерений погрешности аппаратуры магнитной записи / Г.Д. Свердличенко, В.А. Слаев, Г.П. Цивирко // Тез. докл. II научно-технической конференции «Дальнейшее развитие теории и техники магнитной записи». М. – Киев: 1978. НТОРЭС им. А.С. Попова. С. 80–81.
250. А.с. № 669386 СССР, МКИ G11B 5 / 00. Способ измерения искажений при магнитной записи и воспроизведении / А.И. Соболев, В.А. Слаев, А.Н. Баранов. - № 2505506/18-10; заявлено 21.04.77; опубл. 25.06.79. - УДК 534.852(088.8) // Открытия. Изобретения. 1979, № 23. С. 168.
251. US Patent 4.003.084, Int. Cl. G11B 27 / 36. Method of and means for testing a tape record / playback system / J.C. Fletcher et al. - Appl. No 561956, Filed 25.03.75, 11.01.77.
252. А.с. № 442437 СССР, МКИ G01r 23 / 02. Способ определения переходных характеристик / В.А. Слаев, Г.П. Цивирко, Б.А. Школьник. - № 1831256 / 18-10; заявлено 26.09.72; опубл. 05.09.74. - УДК 534.852 // Открытия. Изобретения. 1974, № 33. С. 125.
253. А.с. № 474840 СССР, МКИ G11b 11 / 00. Устройство для измерений переходных характеристик аппаратуры магнитной записи / В.А. Слаев, Г.П. Цивирко, Б.А. Школьник. - № 1893317/18-10; заявлено 15.03.73; опубл. 25.06.75. - УДК 681.846.73 // Открытия, Изобретения. 1975, № 23. С. 122.
254. А.с. № 501366 СССР, МКИ G01R 29 / 02. Способ измерения переходной характеристики аппаратуры магнитной записи / А.Н. Баранов, В.А. Слаев. - № 2069342 / 18–10; заявлено 18.10.74; опубл. 30.01.76. - УДК 621.3.087 // Открытия. Изобретения. 1976, № 4. С. 130.
255. А.с. № 508799 СССР, МКИ G11B 27 / 36. Устройство для измерения переходной характеристики аппаратуры магнитной записи / А.Н.

- Баранов, В.А. Слаев. - № 2054591 / 18-10; заявлено 26.08.74; опубл. 30.03.76. - УДК 681.84.083.8 // Открытия. Изобретения. 1976, № 12. С. 127–128.
256. А.с. № 513372 СССР, МКИ G11B 5 / 00. Устройство для определения переходных характеристик многоканальной аппаратуры магнитной записи / В.А. Слаев, А.И. Соболев. - № 2079787 / 18–10; заявлено 02.12.74; опубл. 05.05.76. - УДК 534.852 // Открытия. Изобретения. 1976, № 17. С. 162.
257. А.с. № 562863 СССР, МКИ G11B 27/36. Устройство для измерения переходных характеристик магнитной записи / В.А. Слаев, А.И. Соболев. - № 2146563 / 10; заявлено 20.06.75; опубл. 25.06.77. - УДК 681.327.6 // Открытия. Изобретения. 1977, № 23. С. 154.
258. А.с. № 566206 СССР, МКИ G01R 27 / 28. Устройство идентификации динамических характеристик четырехполосника / В.А. Слаев, Б.А. Школьник. - № 2098439 / 21; заявлено 22.01.75; опубл. 25.07.77. - УДК 621.317.757 // Открытия. Изобретения. 1977, № 27. С. 133.
259. А.с. № 288141 СССР, МКИ G01r 25 / 04. Способ измерения изменения сдвига фаз / Е.Д. Колтик, В.А. Слаев. - № 1346518 / 18–10; заявлено 08.07.69; опубл. 03.12.70. - УДК 621.317.373(088.8) // Открытия. Изобретения. 1970, № 36.- С. 81.
260. А.с. № 296054 СССР, МКИ G01r 25 / 04. Устройство для измерения изменения сдвига фаз / Е.Д. Колтик, И.П. Павлов, В.А. Слаев. - № 1346517 / 18–10; заявлено 08.07.69; опубл. 12.02.71. - УДК 621.317.772(088.8) // Открытия. Изобретения. 1971, № 8. С. 140.
261. А.с. № 507828 СССР, МКИ G01R 25 / 00. Устройство для измерения нелинейности фазочастотных характеристик / В.А. Слаев. - № 2069352 / 26–21; заявлено 18.10.74; опубл. 25.03.76. - УДК 621.317.757(088.8) // Открытия. Изобретения. 1976, № 11. С. 128.
262. А.с. № 541124 СССР, МКИ G01R 25 / 04. Устройство для измерения сдвига фаз / В.А. Слаев, В.А. Овчинников. - № 2146614 / 21; заявлено 20.06.75; опубл. 30.12.76. - УДК 621.317.772(088.8) // Открытия. Изобретения. 1976, № 48. С. 124.
263. Метод определения фазочастотной характеристики аппаратуры точной магнитной записи / Е.Д. Колтик, В.А. Слаев // Тез. докл. I Всесоюзной научно-технической конференции по теории и технике магнитной записи. Киев: КДНТП, 1969. С. 32.
264. Методы определения фазочастотных характеристик аппаратуры магнитной записи–воспроизведения случайных сигналов / А.К. Грольман, В.А. Слаев // Тез. докл. VI научно-технической конференции молодых ученых «Современные методы и проблемы электрических и магнитных измерений». Л., 1970. С. 46–47.

265. Оценка точности магнитной записи / В.А. Слаев, А.Н. Баранов, А.И. Соболев. Л.: ВНИИМ, 1975. 67 с. (Промежуточный отчет по НИР «Минор»).
266. Оценка точности магнитной записи / В.А. Слаев, А.Н. Баранов, А.И. Соболев. Л.: ВНИИМ, 1975. 82 с. и 10 с. приложений. (Заключительный отчет по НИР «Минор»).
267. Устройство для автоматического определения амплитудных характеристик / В.А. Слаев // Тез. докл. XXIII научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.И. Ленина. Л.: ЛИАП, 1970.
268. Метод измерения суммарного уровня помех в аппаратуре магнитной записи / А.К. Грольман, В.А. Слаев // Тез. докл. VI научно-технической конференции молодых ученых «Современные методы и проблемы электрических и магнитных измерений». Л., 1970. С. 49–51.
269. А.с. № 351166 СССР, МКИ G01г. Устройство для определения амплитудных характеристик четырехполюсников / Э.С. Клибанов, В.А. Слаев. - № 1489589 / 18–10; заявлено 02.11.70; опубл. 13.09.72. - УДК 621.317.7.083.5(088.8) // Открытия. Изобретения. 1972, № 27. С. 152.
270. Определение нелинейных искажений белого шума при магнитной записи и воспроизведении / А.Н. Баранов, В.А. Слаев, А.И. Соболев // Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции «Повышение эффективности трактов магнитной записи–воспроизведения». Вильнюс, 1976. С. 68–70.
271. А.с. № 547831 СССР, МКИ G11В 27 / 36. Способ измерения нелинейных искажений в аппаратуре магнитной записи / В.А. Слаев, Г.П. Цивирко, Б.А. Школьник. - № 1876404 / 10; заявлено 29.01.73; опубл. 25.02.77. - УДК 681.84.001.2(088.8) // Открытия. Изобретения. 1977, № 7. С. 158.
272. Метод измерений изменений времени запаздывания сигнала в тракте магнитной записи–воспроизведения / А.И. Соболев, В.А. Слаев, А.Н. Баранов // Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции «Повышение эффективности трактов магнитной записи–воспроизведения». Вильнюс, 1976. С. 88–89.
273. А.с. № 556492 СССР, МКИ G11В 27 / 36. Способ измерения колебаний времени запаздывания сигналов, воспроизведенных с подвижного носителя / В.А. Слаев, А.И. Соболев. - № 2172282 / 10; заявлено 16.09.75; опубл. 30.04.77. - УДК 621.317.799:681.84(088.8) // Открытия. Изобретения. 1977, № 16. С. 150.

274. Измерение временных искажений регистрируемого сигнала, вызванных скольжением магнитного носителя / А.И. Соболев, В.А. Слаев // В кн. «Современные проблемы метрологии», Вып. 6. М.: Атомиздат, 1977. С. 30–31.
275. Разработка и исследование образцовых средств поверки аналоговой аппаратуры магнитной записи–воспроизведения / А.Н. Баранов, Г.Д. Свердличенко, В.А. Слаев, А.И. Соболев, Г.П. Цивирко. Л.: ВНИИМ, 1978. 59 с. (Отчет по НИР х/д 1470 от 20.10.77).
276. Разработка и исследование образцовых средств поверки аналоговой аппаратуры магнитной записи–воспроизведения. Методика поверки. Л.: ВНИИМ, 1979. 13 с. (Отчет по НИР х/д 1470 от 20.10.77).
277. Разработка и исследование образцовых средств поверки аналоговой аппаратуры магнитной записи–воспроизведения. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Л.: ВНИИМ, 1979. 39 с. (Отчет по НИР х/д 1470 от 20.10.77).
278. Метод определения динамических характеристик аппаратуры магнитной записи / В.А. Слаев, Г.П. Цивирко, Б.А. Школьник // Тез. докл. 1 Всесоюзного симпозиума «Динамические измерения». Л.: 1974. С. 39–40.
279. Метод определения динамических характеристик / В.А. Слаев, Г.П. Цивирко, Б.А. Школьник // Метрология. 1975, № 1. С. 70–74.
280. Экспериментальное определение импульсной переходной функции каналов аппаратуры точной магнитной записи / А.Н. Баранов, В.А. Слаев, А.И. Соболев // Современные проблемы метрологии. М.: Атомиздат, 1977, Вып. 6. С. 29–30.
281. Методы и средства для определения динамических характеристик аппаратуры точной магнитной записи / А.Н. Баранов, Е.Д. Колтик, В.А. Слаев, А.И. Соболев, Г.П. Цивирко // Тез. докл. II Всесоюзного симпозиума «Динамические измерения». Л.: 1978. С. 156–158.
282. Основные направления работ по созданию установок высшей точности и эталонов для метрологического обеспечения средств измерения постоянных и низкочастотных линейных ускорений / А.Е. Синельников // Измерительная техника. 1977, № 3. С. 60–62.
283. Комплекс эталонных и образцовых средств для воспроизведения постоянных и низкочастотных линейных ускорений / И.М. Артемьев, Б.Э. Блантер, С.А. Ковчин, А.Е. Синельников, Г.А. Смирнов, С.А. Шейнберг // Труды метрологических институтов СССР, Вып. 205 (265). Л.: Энергия, 1977. С. 3–7.
284. ГОСТ 8.179–76. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и общесоюзная по-

- верочная схема для средств измерений постоянного линейного ускорения твердого тела в диапазоне 0,001–200 м/с². М.: Изд-во стандартов, 1976.
285. ГОСТ 8.138–75. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений перемещения, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот 0,5–10 Гц. М.: Изд-во стандартов, 1975.
286. Математическое моделирование и физическое исследование процессов в тактированных потокочувствительных магнитных головках и области их практического использования / Л.К. Сафронов, В.А. Слаев // Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции «Повышение эффективности трактов магнитной записи–воспроизведения». Вильнюс, 1976. С. 31–32.
287. Исследование нового преобразователя угол–код на основе магнитной записи и потокочувствительного считывания / Е.Д. Колтик, Л.К. Сафронов, В.А. Слаев, Э.В. Филиппов // Труды метрологических институтов СССР «Исследования в области электрических измерений», Вып. 214 (274). Л.: Энергия, 1977. С. 64–71.
288. Активное экранирование прецизионных магнитных преобразователей углов и угловых скоростей / В.А. Слаев, Л.К. Сафронов. - В кн. «Полупроводниковые устройства и термопреобразователи». Л., 1978. С. 25–28.
289. Особенности построения генератора импульсов тактированных угловых преобразователей автоматизированных систем управления / Л.К. Сафронов, В.А. Слаев. - В кн. «Полупроводниковые устройства и термопреобразователи». Л., 1978. С. 64–67.
290. Проблемы тактированной потокочувствительной магнитной записи и цифрового преобразования сигналов при создании эталонов и образцовых средств измерений параметров движения / В.А. Слаев, Л.К. Сафронов // Труды метрологических институтов СССР «Исследования в области измерения параметров движения», Вып. 240 (300). Л.: Энергия, 1979. С. 33–38.
291. Применение материалов с переменными магнитными свойствами в устройствах магнитной записи / Л.К. Сафронов, В.А. Слаев // Тез. докл. XVI Всесоюзного совещания по магнитным элементам автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1979. С. 188–190.
292. Использование физических явлений при построении преобразователей магнитных полей в системах контроля параметров объектов / Л.К. Сафронов, В.А. Слаев // Тез. докл. II Всесоюзного совещания

- «Точные измерения электрических величин: переменного тока, напряжения, мощности, энергии и угла фазового сдвига». Л., 1985. С. 23–24.
293. Исследование метрологических характеристик образцовой центрифуги / И.М. Артемьев, Я.М. Кандель, А.В. Лебедев, А.Е. Синельников // Труды метрологических институтов СССР «Измерения линейных ускорений», Вып. 205 (265). Л.: Энергия, 1977. С. 7–12.
294. Исследование метрологических характеристик эталонной установки ДЦ-1 / Б.Э. Блантер, А.Е. Синельников // Труды метрологических институтов СССР «Измерения линейных ускорений», Вып. 205 (265). Л.: Энергия, 1977. С. 13–18.
295. Разработка и исследование магнитных преобразователей «уголкод» инфразвукового диапазона частот для систем воспроизведения углов и угловых скоростей / Л.К. Сафронов: Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., 1977. 18 с.
296. Вопросы измерения зависимостей между величинами / П.Н. Агалецкий // Измерительная техника, 1968, № 6. С. 8–14.
297. Об определении зависимостей между физическими величинами / К.П. Широков // Труды метрологических институтов СССР, Вып. 130 (190). Л., 1971. С. 23–26.
298. Fundamental concepts of measurement / L. Finkelstein. - In: "Measurement and Instrumentation", Acta IMEKO, 1973, Budapest, 1974, v. 1. P. 11–27.
299. Научно-технический отчет по НИР 01.12.54.42 (Приложение 9) / В.А. Слаев. Л.: ВНИИМ, 1975. 99 с.
300. Нормирование и определение динамических свойств средств измерений / В.О. Арутюнов, В.А. Грановский, С.Г. Рабинович // Измерительная техника. 1975, № 12. С. 25–37.
301. Методы оценки точности аппаратуры магнитной записи / В.А. Слаев, А.Н. Баранов, А.И. Соболев. - «Результаты законченных в 1975 году научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ВНИИМ и его филиалов». Л.: ВНИИМ, 1976. С. 161–162.
302. Образцовые средства поверки аналоговой аппаратуры магнитной записи и воспроизведения / В.А. Слаев, А.Н. Баранов, Г.Д. Свердличенко, А.И. Соболев, Г.П. Цивирко. - «Важнейшие результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», законченных в 1979 году». Л.: ВНИИМ, 1980. С. 102–103.
303. О роли временных соотношений в процессах измерений / В.А. Балалаев, В.В. Скотников, В.А. Слаев, В.И. Фоменко // Тез. докл. III

- Всесоюзного симпозиума «Динамические измерения». Л., 1981. С. 9–11.
304. Анализ временных соотношений параметров измерительного процесса / В.А. Балалаев, Е.Д. Колтик, В.В. Скотников, В.А. Слаев, В.И. Фоменко // Тез. докл. научно-технического совещания «Вопросы динамики электрометрической аппаратуры». Тарту, 1982. С. 3–6.
 305. Методологические аспекты метрологии / В.А. Балалаев, В.В. Скотников, В.А. Слаев, В.Н. Романов. // Тез, докл. VI Всесоюзной научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». М., 1984. С. 3–5.
 306. Современное состояние метрологического обеспечения и сертификации датчиков / Ю.В. Тарбеев, В.А. Слаев // Измерительная техника, 1993. № 11. С. 3–8.
 307. Метрологические проблемы информационных технологий / В.А. Слаев // Измерительная техника, 1994, № 11. С. 4–8.
 308. О месте теоретической метрологии в системе наук и ее предметной области / В.А. Слаев // Тезисы докладов НТК «Диагностика, информатика и метрология - 95», СПб, 1995. С. 23–24.
 309. Инварианты в метрологии и технической диагностике / Л.А. Мионовский, В.А. Слаев // Измерительная техника, 1996, № 6. С. 3–14.
 310. Нормирование динамических характеристик средств измерений с использованием Марковских параметров / В.А. Слаев // Тезисы докладов НТК «Диагностика, информатика, метрология, экология, безопасность - 96», СПб, 1996. С. 132–133.
 311. Математические аспекты теории измерений / В.А. Слаев // Тезисы докладов НТК «Датчик-96», Т. 1, Гурзуф, 1996. С. 14–15.
 312. Научно-технический отчет по НИР 97/11 а «Исследования по разработке основных направлений развития системы обеспечения единства измерений в областях измерений, закрепленных за ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» / Отв. исполнитель В.А. Слаев: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, СПб., 1998. 357 с.
 313. Основные направления развития научных исследований в области метрологии / В.С. Александров, А.П. Себекин, В.А. Слаев // Труды III сессии Международной научной школы «Современные фундаментальные проблемы и прикладные задачи теории точности и качества машин, приборов, систем» ТРАQМDS'98, СПб., 1998. С. 103–104.
 314. Повышение качества измерений планированием измерительной процедуры / В.А. Слаев, А.Г. Чуновкина, А.В. Чурсин // Измерительная техника, 1999, № 10. С. 9–13.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ АББРЕВИАТУР И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- А — аттенюатор
- АМЗ — аналоговая аппаратура точной магнитной записи
- АИМ — амплитудно-импульсная модуляция
- АМ — амплитудная модуляция
- АРУ — автоматическая регулировка усиления
- АС — амплитудный селектор
- АСУТП — автоматизированная система управления технологическими процессами
- АХ — амплитудная характеристика
- АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
- БАМ — балансно-амплитудная модуляция
- БВ — блок вычитания, компаратор
- БВН — способ записи «без возвращения к нулю»
- БВНМ — способ записи «без возвращения к нулю модифицированный»
- БЗ — блок задержки
- БИП — блок измерения погрешности
- БКЧ — блок когерентных частот
- БП — блок питания
- БР — блок регистрации (самопишущий прибор)
- БРЗ — блок регулируемой задержки
- БС — блок синхронизации
- БУ — блок управления
- В — вольтметр
- ВИМ — время-импульсная модуляция
- ВК — вспомогательный канал
- ВН — способ записи «с возвращением к нулю»
- ВС — временной селектор
- ВФ — весовая функция
- ВЧП — высокочастотное подмагничивание
- Г — генератор синусоидального сигнала

ГИС — генератор испытательного сигнала
ГОС — генератор опорного сигнала
ГПС — генератор псевдослучайного сигнала, государственная поверочная схема
ГПЭ — государственный первичный эталон
Д — делитель
ДЦ — дифференцирующая цепь
И — логическая схема «И»
ИВК — измерительно-вычислительный комплекс
ИВФ — импульсная весовая функция
ИДХ — измеритель динамических характеристик
ИИС — измерительная информационная система
ИК — исследуемый (измерительный) канал
ИОСИ — исходное образцовое средство измерений
ИПМР — измеритель погрешности магнитной регистрации
К — коррелометр
Кв — квадрататор
ЛПМ — лентопротяжный механизм
МП — Марковские параметры
МС — метрологическая система
НМХ — нормируемая метрологическая характеристика
О — осреднитель (интегратор)
ОСИ — образцовое средство измерений
ОФМ — относительная фазовая манипуляция
П — переключатель
ПАМ — паразитная амплитудная модуляция
ПМГ — потокочувствительная магнитная головка
ПФ — полосовой фильтр
Р — регистр сдвига
РН — регулятор напряжения
РФ — режекторный фильтр
С — сумматор
СД — счетчиковый делитель
СИ — средство измерений
СМО — система метрологического обеспечения
СПИ — система передачи информации
СС — схема сравнения
СХ — синхронизатор
Т — триггер
ТЗ — техническое задание

ТУ — технические условия
 У — усилитель
 УВ — управляемый вентиль
 УГ — управляемый генератор
 УО — усилитель-ограничитель
 УП — управляемый переключатель (коммутатор)
 Ф — формирователь
 ФВ — фазовращатель
 ФВЧ — фильтр верхних частот
 ФИ — фазоизмеритель (фазометр)
 ФИМ — фазо-импульсная модуляция
 ФМ — фазовая модуляция
 ФНЧ — фильтр нижних частот
 ФЧХ — фазо-частотная характеристика
 ЧИМ — частотно-импульсная модуляция
 ЧМ — частотная модуляция
 ЧС — частотный селектор
 ШИМ — широтно-импульсная модуляция
 σ — среднее квадратическое отклонение
 E — символ математического ожидания
 $x(t)$ — входной сигнал
 Δ_i — абсолютная погрешность
 L_j — функциональное пространство
 $y(t)$ — выходной сигнал
 $n(t)$ — помеха
 $K(\dots)$ — коэффициент преобразования
 t — текущее время
 τ — временной сдвиг
 min — минимум
 max — максимум
 δ — дельта-функция Дирака
 D — дисперсия
 R — корреляционная функция
 $|f(t)|$ — модуль функции $f(t)$
 cos — косинус
 sin — синус
 $Q(p)$ — передаточная функция
 S, \dot{S} — вектор состояния системы и его производная
 φ — измеряемая физическая величина

δ_0 — относительная погрешность измерения мгновенного значения физической величины

δ_Φ — относительная погрешность, обусловленная изменением измеряемой величины за время измерений

δ_s — относительная погрешность, обусловленная изменением за время измерений метрологических характеристик средства измерений в нормальных условиях

δ_Ψ — относительная результирующая погрешность, обусловленная изменением за время измерений всех влияющих величин Ψ за пределами нормальных условий

δ_V — относительная погрешность, обусловленная изменениями параметров органов восприятия оператора-наблюдателя V за время измерений

δ_n — нормированное значение относительной погрешности измерений

$\tau_{изм}$ — время измерений

$(\tau_{изм})_{пр}$ — предельная продолжительность времени измерений

$(\tau_{изм})_p$ — рабочий интервал времени измерений

$U(t)$ — зависимость напряжения электрического тока от времени

h — постоянная Планка

e — заряд электрона

γ — приведенная погрешность измерений

P — мощность

Σ — символ суммирования

$K(\Sigma)$ — символ качества системы

L_i — множество типа решетки

$\{m^i\}$ — подмножество однородных систем i -го типа

Π — символ произведения

λ_{mi} — оценка качества системы m_k^i

\vee, \wedge — операции взятия верхней и нижней границ

$N_{j(k)}^i$ — уровень порядка оценок

b_p, b_n — реальный и номинальный коэффициенты преобразования временного масштаба сигнала

$q(t)$ — импульсная весовая функция

m_i — момент импульсной весовой функции

μ_i — модифицированный момент импульсной весовой функции

h_i — Марковские параметры

ω — круговая частота

φ_i — базисные функции

R_j — отношение предпочтения

Ω_f — множество моделей f_i
 λ_j — степени важности
 $U_j(f_i)$ — функции полезности
 μ_j — функции принадлежности
 \sup — супремум
 $S(\omega)$ — спектральная плотность мощности
 $V(z)$ — скорость магнитного носителя
 $T_{ис}$ — период испытательного сигнала
 T_c — период воспроизведенного сигнала
 Θ_i — значения времени запаздывания
 $U_{зап}$ — сигнал на входе АМЗ в режиме записи
 $U_{воспр}$ — сигнал на выходе АМЗ в режиме воспроизведения

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Аппаратура точной магнитной записи аналоговых электрических сигналов как звено измерительных информационных систем и ее метрологическое обеспечение	
1.1. Применение магнитной записи-воспроизведения электрических сигналов в измерительной технике и особенности аппаратуры точной магнитной записи, как объекта метрологических исследований.....	7
1.2. Основные источники искажений сигналов измерительной информации в каналах магнитной записи–воспроизведения и существующие методы их измерения.....	13
1.3. Задачи метрологического обеспечения средств измерений с магнитной записью-воспроизведением электрических сигналов ..	23
Глава II. Методы определения метрологических характеристик аппаратуры точной магнитной записи	
2.1. Вопросы создания систем метрологического обеспечения	27
2.2. Метрологические характеристики аппаратуры точной магнитной записи и их нормирование	45
2.3. Методы оценки основной погрешности регистрации сигналов измерительной информации в каналах аппаратуры точной магнитной записи	58
2.4. Методы определения динамических характеристик каналов аппаратуры точной магнитной записи.....	69
2.4.1. Методы определения импульсной весовой функции каналов аппаратуры точной магнитной записи.....	70
2.4.2. Методы определения фазо-частотных характеристик каналов аппаратуры точной магнитной записи.....	87
2.5. Методы оценки нелинейных искажений и колебаний времени запаздывания сигнала в каналах аппаратуры точной магнитной записи	93

Глава III. Аппаратурная реализация методов определения метрологических характеристик аппаратуры точной магнитной записи	
3.1. Средства измерений для экспериментального определения метрологических характеристик каналов аппаратуры точной магнитной записи	101
3.1.1. Измерители погрешности магнитной регистрации	101
3.1.2. Измерители динамических характеристик каналов АМЗ	119
3.1.3. Установка для поверки информационно-измерительных систем	127
3.2. Особенности разработанных средств измерений с магнитной записью–воспроизведением сигналов для применения в метрологической практике	131
Заключение	141
Библиографический список	143
Перечень используемых аббревиатур и условных обозначений	167

Валерий Абдуллович Слаев

**Метрологическое обеспечение аппаратуры
магнитной записи**

Научное издание

Издание подготовлено
в АНО НПО «Мир и Семья»
191023, Санкт-Петербург, ул. Садовая, 28–30, корп. 35.

Ответственный за выпуск: *Жадобина Т.И.*
Компьютерная верстка: *Николаева А.А.*

Сдано в набор 20.11.2003. Подписано к печати 05.03.2004.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная, плотность 80 г/см².
Объем 11 п.л. Тираж 1000 экз.