

# Магнитная звукзапись

Аппаратура магнитной записи в настоящее время занимает ведущее место среди бытовой РЭА, отсюда вполне понятен и неослабевающий интерес к ней.

С широким распространением проигрывателей компакт-дисков и других способов цифровой звукзаписи интерес к бытовым цифровым магнитофонам постепенно угас. Поэтому остановимся на аналоговой магнитной записи.

Современный магнитофон представляет собой достаточно сложную систему различных устройств, в которых протекают магнитные, электрические, электромеханические и механические процессы и от которых во многом зависит качество записи/воспроизведения. И, конечно же, главный из этих процессов — процесс, протекающий в зоне магнитного взаимодействия магнитной головки и носителя записи.

Основная функция магнитофона — записывать и воспроизводить звуковую информацию с минимальными искажениями (нелинейными, частотными, фазовыми) при максимальном сохранении отношения сигнал/шум. Технические требования к параметрам бытовых магнитофонов оговорены ГОСТ 24863-87.

Первые попытки записи осуществлялись путем подачи в магнитную головку тока, соответствующего звуковому сигналу. Искажения, вызываемые при таком способе записи нелинейностью кривой намагничивания (петли гистерезиса) магнитной ленты (рис. 2.1) были значительно снижены с помощью смещения постоянным подмагничивающим током.

Благодаря этому начальный уровень напряженности поля магнитной головки записи выводится на середину одного из линейных участков петли гистерезиса (рис. 2.2). Однако высокий уровень собственных шумов паузы, низкая перегрузочная способность и появление квадратичных искажений, помимо кубических, не позволяют использовать этот способ для высококачественной звукзаписи. В настоящее время этот способ подмагничивания используется только в самых дешевых магнитофонах.

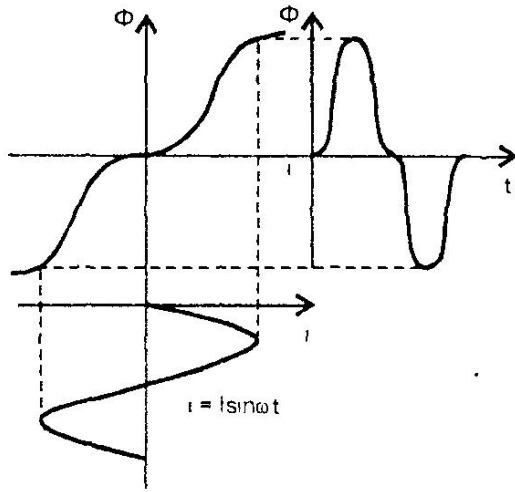


Рис. 2.1. Искажения сигнала при записи без подмагничивания

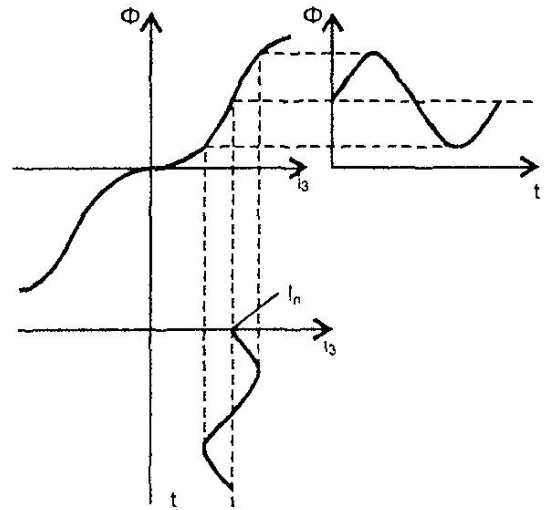


Рис. 2.2. Процесс записи с постоянным подмагничиванием

Указанные недостатки в значительной степени были устранены применением в качестве подмагничивающего тока фиксированной амплитуды с частотой, в 3...5 раз превышающей верхнюю граничную частоту сигнала записи. Быстропеременное поле ВЧ-подмагничивания устраняет гистерезис рабочего слоя магнитной ленты для медленно изменяющегося записываемого сигнала. От уровня этого тока зависит протяженность линейного участка, а значит и перегрузочная способность носителя записи (рис. 2.3). Однако и этот способ имеет такой существенный недостаток как компрессирование ВЧ-составляющих сигнала и вследствие этого — большие модуляционные искажения.

Во второй половине 80-х годов с развитием различных систем динамического подмагничивания (СДП) начался четвертый этап развития аналоговой магнитной звукозаписи. Действие всех разновидностей СДП направлено на преодоление противоречия условий оптимальной записи высокочастотных и низкочастотных сигналов (рис. 2.4).

Для компенсации частотных искажений, возникающих в системе «головка записи — магнитная лента — головка воспроизведения» используют усилители записи и воспроизведения с соответствующими

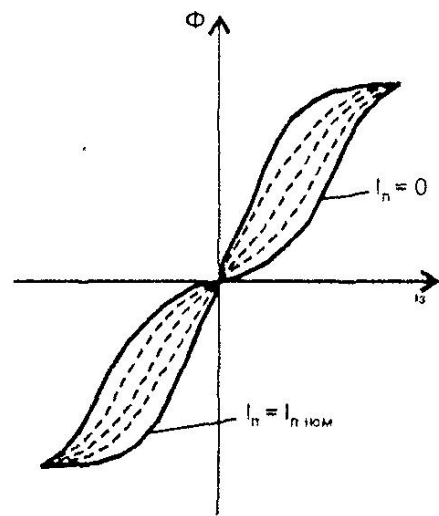


Рис. 2.3. Кривые намагничивания носителя в зависимости от тока подмагничивания

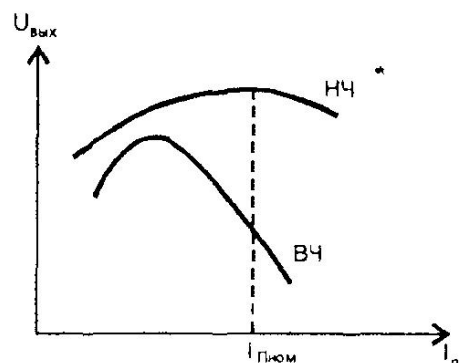


Рис. 2.4. Кривые остаточной намагниченности ВЧ- и НЧ-составляющих сигнала при номинальном токе подмагничивания

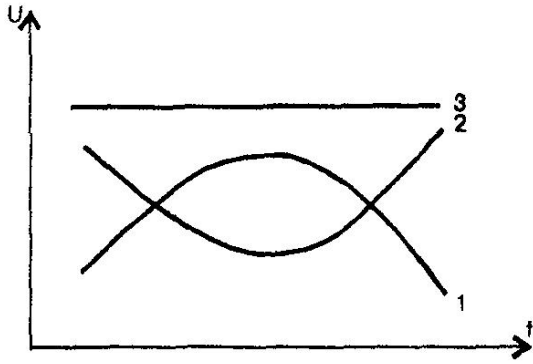


Рис. 2.5. Характеристики тракта записи-воспроизведения:  
1 — записи, 2 — воспроизведения,  
3 — сквозная

щими цепями коррекции с результирующей характеристикой 2 (рис. 2.5), обратной реальной частотной характеристикой 1 системы. В этом случае общая характеристика тракта звукопередачи, под которой понимают график зависимости напряжения на выходе усилителя воспроизведения от частоты, приобретает вид прямой 3, параллельной оси частот, что означает отсутствие частотных искажений.

В отличие от грамзаписи, где предыскажения записи и воспроизведения носят обратимый характер и не приводят к фазовым искажениям, в магнитной записи фазовые искажения неизбежны.

Для более глубокого понимания процесса записи-воспроизведения обратимся к графикам (рис. 2.6) [9], относящимся к кассетному магнитофону.

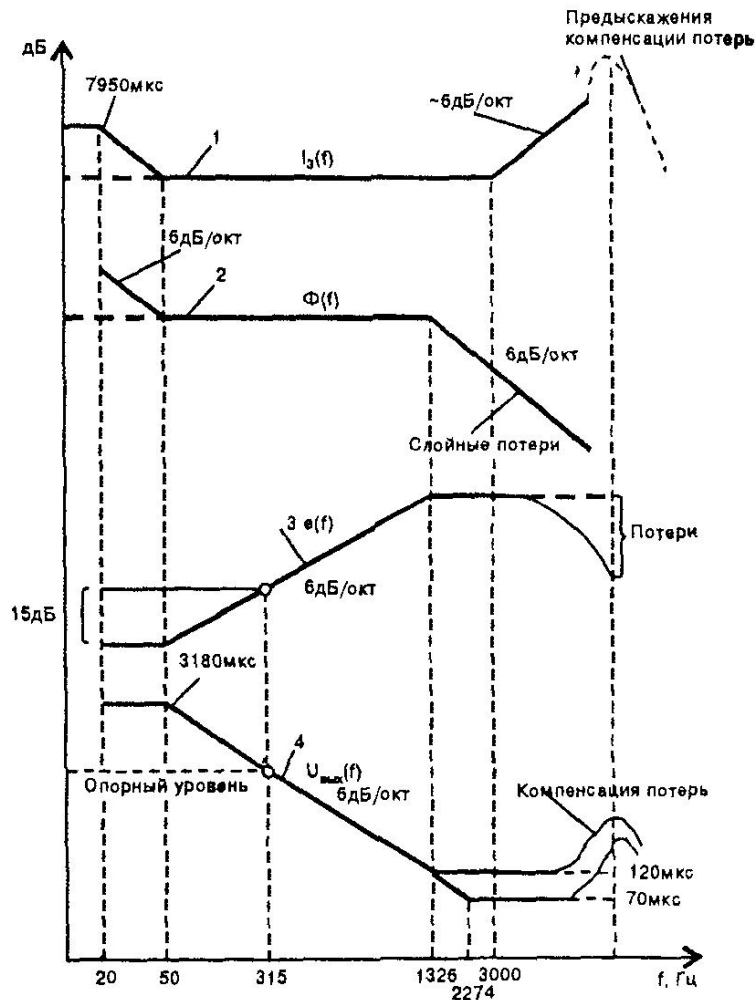


Рис. 2.6. Характеристики тракта магнитной записи-воспроизведения: 1 — АЧХ усилителя записи, 2 — нормированная характеристика остаточного магнитного потока, 3 — ЭДС воспроизводящей головки, 4 — АЧХ усилителя воспроизведения

АЧХ усилителя записи представлена кривой 1 (из расчета осуществления записи от генератора тока). Сразу отметим, что коррекция в области 50 Гц и ниже в профессиональной аппаратуре не применяется (пунктирная линия). Предыскажения в области ВЧ с частотой перегиба около 3 кГц и крутизной около 6 дБ/окт вызваны необходимостью компенсации потерь от многочисленных мешающих факторов, зависящих как от частоты сигнала (длины волны), так и от скорости движения ленты. Кривая 2 — нормированная характеристика остаточного магнитного потока. ЭДС воспроизводящей головки представлена кривой 3. Фигурной скобкой в области ВЧ показаны реальные потери при воспроизведении с магнитной ленты. При воспроизведении с помощью задатчика магнитного поля (индукционной кассеты) этих потерь нет (пунктирная линия). Обычно в паспорте головки указывают ЭДС на частоте 315 Гц (400 или 1000 Гц для катушечных магнитофонов для скоростей 4, 9 и 19 см/с, соответственно). И, наконец, кривая 4 — АЧХ усилителя воспроизведения. Для коррекции АЧХ в области ВЧ часто используют параллельный LC-контур, выполненный подключением конденсатора параллельно магнитной головке. Настраивают УВ, как правило, с помощью стандартных измерительных лент.

Поскольку, как видно из графиков, крутизна передаточных характеристик УЗ и УВ не превышает 6 дБ/окт, частотные характеристики требуемой формы можно сформировать с помощью простых RC-цепей первого порядка в цепи ОС неинвертирующего усилителя (рис. 2.7) или с помощью пассивных корректирующих RC-звеньев (рис. 2.8).

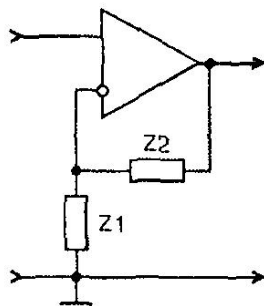


Рис. 2.7. Коррекция УВ в цепи ООС

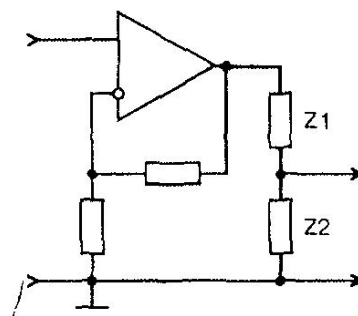


Рис. 2.8. Пассивная коррекция УВ

Инвертирующий корректор в УВ не нашел применения из-за неудовлетворительного отношения сигнал/шум, а чисто пассивная коррекция — из-за больших потерь сигнала, хотя она и имеет некоторые преимущества с точки зрения фазовых и других видов искажений.

Наиболее оптимальным необходимо признать комбинированный способ коррекции, при котором коррекция в области низких и средних частот активная — с помощью стандартных постоянных времени  $\tau_2$  (3180 мкс) и  $\tau_1$  (120 мкс для ленты МЭК-1 и 70 мкс — для остальных), а в области ВЧ — пассивная.

Передаточные функции имеют вид:

$$K(p) = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} \quad (\text{для рис. 2.7}),$$

$$K(p) = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{для рис. 2.8}).$$

Каждый перегиб АЧХ усилителей с наклоном 6 дБ/окт вносит фазовый сдвиг от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , который равен  $45^\circ$  на частоте перегиба. Причем, если перегиб против часовой стрелки — происходит опережение ВЧ-составляющих сигнала по отношению к НЧ-составляющим, и наоборот, если перегиб по часовой стрелке — ВЧ-составляющие запаздывают.

Если внимательно присмотреться к АЧХ усилителя записи (кривая 1) и усилителя воспроизведения (кривая 4), мы обнаружим в каждой из них по перегибу в районе средних частот (1,3...3 кГц) в одну сторону, т.е. против часовой стрелки, что для сквозной характеристики дает фазовый сдвиг в этом районе около  $90^\circ$ , а суммарное опережение ВЧ-составляющих по отношению к НЧ-составляющим — около  $180^\circ$ . Что касается перегибов в районе частоты 50 Гц, то они взаимно противоположны, следовательно, и фазовые искажения носят обратимый характер.

Фазовые же искажения тока записи в самой головке при возбуждении ее от генератора тока незначительны (как правило, не превышают  $10...20^\circ$ ).

## 2.1. Основные понятия и определения

**Номинальный уровень записи** — поверхностный удельный магнитный поток короткого замыкания, равный 250 нВб/м и определенный на опорной частоте.

**Опорная частота** — условно выбранная частота сравнения результатов измерений, равная 315 Гц, кроме особо оговоренных случаев.

**Нормированный ток записи** — ток, создающий на типовой ленте (ОСТ 617-528-87) намагниченность с номинальным потоком короткого замыкания (при этом обеспечивается максимально плоская АЧХ записи-воспроизведения на уровне  $-20$  дБ), при этом коэффициент третьей гармоники на опорной частоте не превышает 2%.

**АЧХ воспроизведения** — отношение ЭДС сигнала на верхней частоте к ЭДС на опорной частоте, при воспроизведении измерительной ленты ЗЛИЛ2.Ч.4-120 (с коррекцией для МЭК-1) или ЗЛИЛ2.Ч.4-70 (с коррекцией для МЭК-2), выраженное в децибелах.

## 2.2. Магнитные головки

Основные требования к материалам магнитных головок и к их конструктивному исполнению следующие.

*Записывающая.* Для формирования требуемой критической зоны записи в носителе необходимо, чтобы индукция насыщения материала сердечника головки записи в несколько раз превышала индукцию насыщения носителя. Благодаря этому отсутствует насыщение в суженной части сердечников (в противном случае магнитная цепь сердечников вносит дополнительные искажения). Для получения минимальных потерь на вихревые токи материал сердечника должен иметь большое магнитное сопротивление. Потери на гистерезис минимальны при малом значении коэрцитивной силы (остаточной намагниченности) материала. Рабочий зазор около 3 мкм. Введение более широкого (50...100 мкм) дополнительного зазора предотвращает намагничивание сердечника головки в момент включения генератора подмагничивания и ослабляет влияние нестабильности контакта и неоднородностей магнитной ленты на головку записи, т.е. линеаризует магнитный поток. Индуктивность головок около 10 мГн.

*Воспроизводящая.* Главное требование — минимальные потери при преобразовании магнитного потока фонограммы. Для этого очень важно, чтобы начальная магнитная проницаемость сердечника головки была максимальной — не менее 10000, при этом коэффициент шунтирования получается близким к 1. Механические свойства материала должны обеспечивать возможность получение рабочего зазора 0,8...1,2 мкм с правильной геометрией. Такой зазор обеспечивает при скорости 4,76 см/с воспроизведение частот до 25 кГц. Для уменьшения волновых искажений на низких частотах (искажения типа «змейка») поверхность головки должна плавно отходить от магнитной ленты, а экраны должны быть удалены от нее на достаточное расстояние. Ширину сердечника головки делают несколько меньше ширины дорожки записи, что способствует уменьшению паразитной амплитудной модуляции (ПАМ) из-за неровностей края ленты и ее смещения по высоте.

Особенно высокие требования предъявляются к экранированию головки от внешних магнитных полей (например, полей двигателя). Головку помещают часто не в один, а в два, а то и три экрана.

*Универсальная.* Поскольку эти головки поочередно выполняют функции МГ записи и воспроизведения, при выборе материала сердечника, прежде всего, руководствуются требованиями для головок воспроизведения. Дополнительным требованием является более высокая индукция насыщения, т.к. напряженность магнитного поля в зазоре 1...2 мкм универсальной головки бывает выше, чем у записывающей с зазором шириной 3...5 мкм. Практически ширина рабочего зазора не может быть меньше 1,2...1,5 мкм, т.к. при меньшем зазоре оказывается невозможным промагничивание глубинных слоев магнитной

ленты, в то время как частицы на поверхности рабочего слоя входят в насыщение. Это приводит к уменьшению динамического диапазона, к искажениям и снижению отдачи магнитной ленты (МЛ) без расширения рабочего диапазона частот. Поэтому рабочий диапазон частот канала воспроизведения с такой головкой ограничен частотой 18...20 кГц. Широко применяемые до недавнего времени пермаллои имеют невысокую износостойкость и непригодны для записи на лентах МЭК-2 и МЭК-4 из-за больших вносимых искажений. Кроме того, при воспроизведении возникают дополнительные частотные искажения из-за пластинчатой структуры сердечника.

Для уменьшения остаточной намагниченности сердечника и снижения шумов при записи сердечники универсальных головок имеют дополнительный зазор, хотя это и уменьшает отдачу при воспроизведении. Глубину рабочего зазора сердечника делают меньше, чем у записывающей головки. Это необходимо для улучшения чувствительности и частотной характеристики при воспроизведении.

Число витков обмотки берется несколько меньше, чем у воспроизводящей головки, что дает больший шум при воспроизведении, в то же время индуктивность головки получается достаточно высокой, что затрудняет ее согласование с ВЧ-генератором подмагничивания. Поэтому в некоторых универсальных головках для облегчения режима записи делают отвод от определенного числа витков обмотки.

Частотные потери в магнитопроводе головок возникают из-за увеличения магнитного сопротивления материала сердечника с увеличением частоты и из-за потерь на вихревые токи в металлических прокладках зазоров. Эти потери с достаточной для практики точностью определяют путем пропускания по обмотке головки тока с постоянной амплитудой, частота которого изменяется в рабочем диапазоне частот, и определения  $Z$  головки. По отклонению графика  $Z = f(\omega)$  от прямой линии ( $Z = \omega \cdot L$ ) вычисляют величину частотных потерь. Результаты измерений верны при условии, что резонансная частота головки значительно выше частоты измерения.

**Стирающая.** Для этой головки больше подходят комбинированные сердечники: с полюсными наконечниками из тонких пластин сендаста или твердого пермаллоя в рабочей зоне и собственно сердечником из марганец-цинкового феррита. Использование феррита обеспечивает снижение потребления мощности ВЧ-генератора примерно в 10...15 раз.

Обмотка содержит небольшое число витков и достаточно большого сечения, что позволяет пропустить через нее относительно большой ток стирания (от 30 до 100 мА). Индуктивность головки находится в пределах 0,2...0,4 мГн.

Более широкий сердечник (чем дорожка записи) обеспечивает надежное стирание со всей дорожки записи. Зазор шириной 0,1...0,4 мм заполняют прокладкой из медной или латунной фольги, слюды или пластмассы.

## Требования к материалам головок

Основные требования к материалам головок и параметры некоторых применяемых материалов приведены в табл. 2.1.

Основные характеристики материалов,  
применяемых для изготовления магнитных головок

Таблица 2.1

Параметр	Головка			Пер- маллой	Феррит	Сендаст	Аморфный материал
	ГЗ	ГВ	ГС	81НМА	3000НМС	10СЮ-ВИ	71КНСР
$B_s$ , Тл, не менее	0,9	0,2	0,5	0,5	0,38	1,0	0,5
$\mu_H$ , не менее	1500	10000	500	60000	3000	35000	12000
$H_c$ , А/м, не более	5	3	10	0,6	12	2,5	1,0
Интенсивность износа, мкм на 100 км, не более	0,5	0,2	5	1,4	—	0,25	0,8

где  $B_s$  — индукция насыщения;  
 $\mu_H$  — начальная магнитная проницаемость;  
 $H_c$  — коэрцитивная сила.

Кроме перечисленных в табл. 2.1, применяются так называемые высокоплотные монокристаллические ферриты (МКФ) и горячепрессованные ферриты (ГПФ). Их главным достоинством является повышенная устойчивость против абразивного износа. Существенное значение имеют также и другие материалы, к которым относятся материалы прокладок в зазорах, конструкционные и изоляционные материалы, обмоточные провода и заливочные компаунды.

Как видно из таблицы, материалов, которые соответствовали бы всем требованиям, пока нет. Поэтому при конструировании и изготовлении головок с учетом конкретных требований, предъявляемых к ним, применяется наиболее близко подходящий материал или комбинация нескольких материалов (комбинированные сердечники).

Ферриты (или «магнитная керамика») представляют собой металлические соединения окислов железа с такими элементами как никель, цинк, марганец и др. с добавками титана и ниобия. По твердости ферриты превосходят сендаст и приближаются к твердости корунда.

Недостаток феррита в том, что в процессе эксплуатации возникает эрозия (микроскопические выкрашивания) рабочей поверхности, которая ухудшает свойства головки. Сердечники из феррита нашли широкое применение в стирающих головках, где эрозия не оказывает существенного влияния на ее параметры.

Повышения износоустойчивости пермалловых магнитных головок достигают путем азотирования рабочей поверхности полюсных наконечников, т.е. создания поверхностного слоя, содержащего нитриды. При этом твердость поверхности возрастает в 2 раза при полном сохранении магнитных свойств.

В настоящее время наилучшим материалом для записывающих, воспроизводящих и универсальных головок является сендаст. Об этом говорят и данные отечественных головок ЗД24.080 (сендаст 10СЮ-ВИ) и ЗД24.844 (сендаст 10СЮИ-ВИ). Железо-алюминий-кремниевые сплавы типа сендаст не уступают пермаллоевым по магнитным свойствам, а железоалюминиевым — по устойчивости этих свойств к механическим воздействиям. Основное их достоинство — высокая твердость и износостойкость.

С целью фиксации ширины зазора и предотвращения заполнения его продуктами износа ленты в него вводят прокладки из немагнитного материала (фосфористой или бериллиевой бронзы, меди, серебра, стекла и др.).

Условное обозначение головок в соответствии со стандартом [10] должно состоять из элементов, приведенных в табл. 2.2.

Элементы обозначения головок

Таблица 2.2

Номер позиции в обозначении головки	Параметр	Значение	Обозначение
1	Ширина ленты	6,3 мм	6
		3,81 мм	3
2	Функциональное назначение	Запись	А
		Воспроизведение	В
		Стирание	С
		Универсальная	Д
Комбинированные	Запись и воспроизведение	К	
	Стирание и запись	М	
	Стирание и воспроизведение	Х	
3	Число одновременно записываемых, воспроизводимых или стираемых дорожек	Одна	1
		Две	2
4	Число дорожек фонограммы в обе стороны	Две	2
		Четыре	4
5	Номер модификации	—	01. .999
6	Группа сложности	—	0, 1, 2
7	Конструктивное исполнение	Нормальные размеры	—
		Уменьшенные	У
		Для узкого окна кассеты	К

Пример условного обозначения: 3К24.1020 — головка записи/воспроизведения (сквозного канала) для работы с лентой 3,81 мм, двухдорожечная, для записи и воспроизведения четырехдорожечной фонограммы, 102-й модификации, 0 группы сложности, стандартных размеров.

Основные параметры некоторых универсальных головок стран СНГ и зарубежного производства сведены в табл. 2.3 и 2.4 [11].

Основные параметры универсальных головок

Таблица 2.3

Параметр	Типа 3Д24			MS15R	RS-2012	TC881CB
	080 844	931	942 952			
Индуктивность, мГн	110...160	90...140	75...125	100.. 130	105...175	105...155
ЭДС воспр. (315 Гц), мкВ	230...330	190...350	170...330	270...390	290...430	160...230
АЧХ воспроизведения ( $f_a/f_0$ ), дБ						
10/0,315	—	—	10 ±3	—	—	9 ±3
12,5/0,315	—	—	—	12 ±3	10 ±3	8,5 ±3
14/0,315	11 ±4	10 ±3	—	—	—	—
18/0,315	12 ±3	—	—	—	—	—
АЧХ записи (-20 дБ), дБ						
МЭК-1 10/0,315	—	—	-11 ±3	—	—	—
12,5/0,315	-14 ±3	—	—	-13 ±3	-15 ±3	-8,5 ±3
МЭК-2 12,5/0,315	—	—	—	—	-14 ±3	-12 ±3
14/0,315	-13 ±4	—	—	—	—	—
18/0,315	-16 ±4	—	—	—	—	—
МЭК-4 12,5/0,315	—	—	—	—	-12 ±3	—
Ток записи (0 дБ, 315 Гц), мкА						
МЭК-1	40.. 80	60...140	30...110	75 ..125	80...125	80...140
МЭК-2	60...120	—	—	90...150	120...180	100 ..200
МЭК-4	—	—	—	115...185	135...195	—
Ток подмагничивания (80 кГц), мА						
МЭК-1	0,2...0,5	0,5...1,5	0,2.. 1,0	0,2...0,5	0,3...0,5	0,3...0,6
МЭК-2	0,4...0,8	—	—	0,4...0,8	0,5...0,8	0,6...1,0
МЭК-4	—	—	—	0,7...1,3	0,8.. 1,2	—

Таблица 2.4

Основные характеристики головок при работе с лентами МЭК-1

Тип головки	Индуктивность, сопротивление, мГн / Ом	Относительная АЧХ		ЭДС воспроизведения на частоте 315 Гц, мкВ	Материал рабочей поверхности	Ток, мА	
		Воспроизве- дения, дБ/на частоте, кГц	Записи, дБ			Записи	Подмаг- ничивания
ЗД24.080 (Вильнос, БКБМЗ)	110...190 / 230...500	9,5/16,0	-18	190...350	Сендаст	0,093	0,53
ЗД24.081 (Вильнос, БКБМЗ)	100...190 / 230...500	12,5/14,0	-17	175...365	Сендаст	0,1	0,55
ЗД24.082 (Вильнос, БКБМЗ)	90...190 / 230...500	7,0/10,0	-15	150...300	Сендаст	0,056	0,29
ЗД24.122 (Вильнос, БКБМЗ)	60...120 / —	8,0/10,0	-16	270 тип.	Пермаллой	0,08	0,45
ЗД24.211 (Киев, «Маяк»)	60...100 / 440 тип.	2,0/12,5	-20	240	Пермаллой	0,13	0,65
ЗД24.221 (Киев, «Маяк»)	85...145 / 440 тип.	2,0/12,5	-19	260	Пермаллой	0,13	0,65
ЗД24.232 (Киев, «Маяк»)	75...145 / 440 тип.	2,0/12,5	-20	210	Пермаллой	0,13	0,65
ЗД24.310 (Запорожье, «Весна»)	120...180 / 400 тип.	7,0/16,0	-22	280 тип.	Сендаст	0,1	0,8
ЗД24.311 (Запорожье, «Весна»)	120...180 / 400 тип.	9,5/14,0	-18	280 тип.	Сендаст	0,1	0,8
ЗД24.312 (Запорожье, «Весна»)	120...180 / 400 тип.	8,0/12,0	-17	280 тип.	Сендаст	0,1	0,8
ЗД24.322 (Запорожье, «Весна»)	120...180 / 400 тип.	5,0/10,0	-16	280 тип.	Сендаст	0,1	0,6
ЗД24.751 (Санкт-Петербург «Магнетон»)	70...120 / —	11,0/14,0	—	>170	Феррит	0,15	0,3
ЗД24.810 (Новосибирск, «Монолит»)	95...155 / 300 тип.	11,5/18,0	-16	210...330	Сендаст	0,04	0,25

Тип головки	сопротивление, мГн / Ом	Воспроизве- дения, дБ/на частоте, кГц	Записи, дБ	на частоте 315 Гц, мкВ	рабочей поверхности	Записи	Подмаг- ничивания
ЗД24.821 (Новосибирск, «Монолит»)	95...155 / 300 тип.	13,5/14,0	-14	210...330	Сендаст	0,04	0,25
ЗД24.832 (Новосибирск, «Монолит»)	90...160 / 300 тип.	9,5/10,0	-12	210...330	Сендаст	0,04	0,25
ЗД24.844 «TF-PVJ»	80.. 120 / 350	11,0/18,0	-16	230...300	Сендаст	0,09	0,6
ЗД24.931 (Боровичи, «Горизонт»)	90...140 / —	10,0/14,0	-16	190...350	Сендаст	0,1	1,0
ЗД24.932 (Боровичи, «Горизонт»)	60...140 / —	9,0/10,0	-14	160...320	Сендаст	0,07	0,6
ЗД24.941 (Боровичи, «Горизонт»)	70...130 / —	10,0/14,0	-16	220...240	Сендаст	0,1	1,0
ЗД24.942 (Боровичи, «Горизонт»)	50...150 / —	9,0/10,0	-14	190...350	Сендаст	0,07	0,6
ЗД24.951 (Боровичи, «Горизонт»)	70...130 / —	10,0/14,0	-16	200...400	Сендаст	0,1	1,0
ЗД24.952 (Боровичи, «Горизонт»)	75...125 / —	10,0/10,0	-11	170...330	Сендаст	0,07	0,6
Н3331 (CANON, Япония)	100...150 / 300 тип.	13,5/14,0	-23	350	Сендаст	0,3	0,52

Табл. 2.4 (продолжение)

Тип головки	Индуктивность, сопротивление, мГн / Ом	Относительная АЧХ		ЭДС воспроизведения на частоте 315 Гц, мкВ	Материал рабочей поверхности	Ток, мА	
		Воспроизведения, дБ/на частоте, кГц	Записи, дБ			Записи	Подмагничивания
H2331 (CANON, Япония)	80...120 / 250 тип.	13,5/14,0	-19	330	Пермаллой	0,042	0,47
H5302 (CANON, Япония)	100...150 / 250 тип.	12,0/12,5	-9,5	350	Пермаллой	0,035	0,52
H2334 (CANON, Япония)	100...150 / 200 тип.	11,5/12,5	-23	340	Пермаллой	0,035	0,4
223-20 (SANKYO, Япония)	80.. 120 / 200 тип.	11,5/12,5	-22	220	Пермаллой	0,051	0,95
555-20 (SANKYO, Япония)	120...160 / 250 тип.	12,5/14,0	-18	250	Пермаллой	0,035	1,0
745-30 (SANKYO, Япония)	80 ..120 / 200 тип.	13,5/14,0	-18	260	Пермаллой	0,051	0,77
HD424SVS (ALPS, Япония)	95...125 / 240 тип.	9,0/10,0	-11	250	Пермаллой	0,035	0,45
HD442GVH (ALPS, Япония)	130. .190 / 350 тип.	9,0/10,0	-10,5	250	Пермаллой	0,04	1,1
M3 (TDK, Япония)	120. 160 / 200 тип.	13,0/14,0	-18	260	Сендаст	0,05	0,78
S-201 (IKEJIRI, Япония)	120...190 / 200 тип.	7,5/12,5	-13	160	Пермаллой	0,035	0,4
S-208 (IKEJIRI, Япония)	120...190 / 200 тип.	9,0/10,0	-10,5	160	Пермаллой	0,045	0,4
S-231 (IKEJIRI, Япония)	120.. 190 / 190 тип.	6,0/8,0	-6	400	Пермаллой	0,035	0,45

Относительная АЧХ головки характеризует частотные потери в реальной головке относительно «идеальной». В частности, относительная АЧХ записи на указанной частоте, показывает на сколько децибел необходимо скорректировать АЧХ тока записи на данной частоте, чтобы получить стандартную АЧХ потока короткого замыкания на магнитной ленте. Относительная АЧХ воспроизведения зависит от ширины и качества рабочего зазора головки. Указанная частота, как правило, является верхней рабочей частотой головки.

Кроме перечисленных, к измеряемым параметрам головок относятся:

- ♦ для универсальных и записывающих головок — модуль полного электрического сопротивления (импеданс) на частоте 1 кГц и на частоте подмагничивания 80 (100) кГц;
- ♦ эффективная длина рабочего зазора;
- ♦ нелинейность рабочего зазора;
- ♦ собственная резонансная частота;
- ♦ сопротивление изоляции обмоток;
- ♦ электрическая прочность изоляции обмоток.

### 2.3. Носители магнитной записи

Анализ новейших достижений изготовления магнитных лент [12, 13] подтверждает факт небывалого улучшения в кратчайшие сроки всей совокупности рабочих параметров носителей магнитной записи. Наибольших успехов в этой области добились фирмы BASF, PHILIPS, AGFA, SONY, FUJI, TDK, MEMOREX, DENON, SCOTCH, THAT'S, SKC.

При появлении первой компакт-кассеты (1965 г.) разработки концерна Philips трудно было вообразить, что это изделие получит столь широкое распространение и так сильно улучшатся его параметры. Если частотный диапазон первых лент был 70...6000 Гц, то у современных — 20...20000 Гц.

*Классификация.* Международной электротехнической комиссией (МЭК) рекомендовано деление магнитных лент на четыре класса (от МЭК-1 до МЭК-4). Кассеты с этими лентами обозначаются Тип 1...Тип 4, соответственно. В зависимости от времени звучания в обе стороны кассеты подразделяются на С-60, С-90, С-120 с толщиной основы 18, 12 и 9 мкм, соответственно.

МЭК-1 .... рабочий слой на основе магнитного порошка игольчатой гамма-окиси железа. С точки зрения режима записи все новейшие ленты этого типа могут быть условно разделены на 2 группы. Первая группа работает при номинальном токе подмагничивания, соответствующем стандарту DIN, вторая — с повышенным током под-

магничивания на 5...10% (в основном японского производства) — наиболее высокого качества.

**МЭК-2** .... рабочий слой на основе магнитного порошка игольчатой модифицированной двуокиси хрома или на его заменителе — кобальтированной гамма-окиси железа. Микрочастицы порошка модифицированной двуокиси хрома имеют идеально правильную поверхность и бездефектную структуру. Толщина ферролакового слоя ленты 6,2 мкм для кассеты С-60 и 4,2 мкм для кассеты С-120. Ленты этого типа имеют повышенный уровень записи при повышенных искажениях.

**МЭК-3** .... двухслойная, нижний слой толщиной 4 мкм — на ферропорошке гамма-окиси железа и верхний (1 мкм) — на магнитном порошке модифицированной двуокиси хрома. Характерная особенность этих лент — широкий динамический диапазон (высокий уровень записи при малом уровне шумов).

**МЭК-4** .... на металлическом (как правило, железном) порошке. Новейшие двухслойные ленты МЭК-4 с суммарной толщиной рабочих слоев 5...5,5 мкм характеризуются высокой чувствительностью при низком уровне шумов.

Основные требования к ферропорошкам следующие:

- ♦ высокое значение коэрцитивной силы  $H_C$  и индукции насыщения  $B_s$ ;
- ♦ высокое значение анизотропии (направленных магнитных свойств);
- ♦ достижение минимальных размеров «элементарных частиц» ( $l = 0,3...0,4$  мкм) и их добротности;
- ♦ термостабильность магнитных свойств и, прежде всего,  $H_C$

Основные параметры лучших современных лент приведены в табл. 2.5.

Основные параметры современных магнитных лент

Таблица 2.5

Параметр\тип	МЭК-1	МЭК-2	МЭК-3	МЭК-4
Чувствительность (333 Гц, 250 нВб/м), дБ	2,3	1,5 ..2,0	1	1,7 ..2,6
Коэффициент 3-й гармоники (333 Гц, 250 нВб/м)	0,3...2,25	0,6. 3,2	—	0,45 .0,7
Макс. уровень записи (333 Гц, $K_s = 3\%$ ), дБ	0,8...4,4	0,8 ..4,0	—	3,2.. 4,9
Сигнал/шум, дБ (взвешенное)	53. 56	55...57	—	57. 62
Насыщение на частоте 10 кГц (250 нВб/м), дБ	10 ..19,8	8,2 ..11,5	—	—
$H_C$ , кА/м	22 28	29 .53,5	> 43	53.. 100
$B_s$ , Тл	0,12. .0,17	0,15 ..0,19	—	0,2...0,35
Коэффициент прямоугольности	0,8	0,85 ..0,87	—	0,8

От частотных характеристик лент зависит, насколько равномерно записывается спектр звукового диапазона. Из-за низкой скорости движения магнитной ленты в кассетных магнитофонах только ленты типа МЭК-4 и лишь немногие МЭК-2 (не говоря уже о МЭК-1) могут обеспечить запись без ограничения динамического диапазона со стороны высоких частот при обычном подмагничивании. Динамический же диапазон низких частот лент МЭК-4 уступает МЭК-2 и МЭК-1.

Среди всего многообразия компакт-кассет наибольшей популярностью у потребителей пользуются кассеты на модифицированной двуокиси хрома, обеспечивающие чистое, «бриллиантовое» звучание. Кассеты с индексом «SM» содержат специальный механизм, обеспечивающий повышение надежности кассет при эксплуатации. Основное назначение механизма — устранение проскальзывания магнитной ленты при намотке.

Анализ кассет зарубежного производства, проведенный Е. Карнауховым, приведен в табл. 2.6.

Параметры кассет зарубежного производства

Таблица 2.6

Группа лент	Тип кассеты	Коэффициент гармоник, %	Уровень записи при $K_c = 3\%$ , дБ	Относительная чувствительность на частоте 315 Гц, дБ	Относительная чувствительность на частоте 10 кГц, дБ	Шумы покоя, дБ	Максимальный уровень записи на 10 кГц, дБ	Неравномерность чувствительности на частоте 315 Гц, дБ	Неравномерность чувствительности на частоте 10 кГц, дБ
МЭК-1	BASF FE90	0,5	4,8	0,1	0,3	53,6	0,1	0,2	0,2
	Fuji DR-ix60	0,9	3,2	-1,1	0,3	54,2	0,9	0,2	0,3
	JVC GI90	1,3	2,4	1,6	-0,8	54,0	-0,1	0,2	0,2
	Maxell UR-90	0,7	4,3	-0,1	-0,1	53,6	-0,1	0,2	0,2
	Maxell XLI-S60	0,4	6,2	0,3	1,6	53,8	2,2	0,2	0,2
	RAKS CD-SX90	0,5	4,6	-0,4	1,0	54,4	1,4	0,2	0,2
	RAKS CD-X90	0,9	4,8	-0,7	0,9	54,4	1,4	0,2	0,2
	RAKS ED-SX90	0,5	4,8	0,3	-0,5	53,8	-1,8	0,2	0,2
	RAKS ED-X90	0,7	4,5	0,3	-0,6	53,9	-1,4	0,2	0,2
	SKC GX 90	0,4	5,0	-0,4	-2,8	52,8	0,6	0,2	0,3
	SKC LX 90	0,8	3,8	-1,3	-1,8	54,6	-1,5	0,2	0,2
	Sony HF 90	0,6	4,4	-0,8	0,3	54,1	0,4	0,2	0,2
	Sony HF-S90	0,4	5,5	0,0	1,9	55,0	2,0	0,2	0,2
	TDK D 90	0,4	4,8	0,0	1,4	53,5	0,9	0,2	0,2
	TDK AD 90	0,4	6,1	0,2	2,6	54,8	3,0	0,2	0,2
TDK AR 90	0,5	7,4	1,1	1,9	55,0	1,0	0,2	0,2	

Табл. 2.6 (продолжение)

Группа лент	Тип кассеты	Коэффициент гармоник, %	Уровень записи при $K_r = 3\%$ , дБ	Относительная чувствительность на частоте 315 Гц, дБ	Относительная чувствительность на частоте 10 кГц, дБ	Шумы покоя, дБ	Максимальный уровень записи на 10 кГц, дБ	Неравномерность чувствительности на частоте 315 Гц, дБ	Неравномерность чувствительности на частоте 10 кГц, дБ
МЭК-2	BASF Chrom EX II 90	1,6	3,3	-1,0	0,1	62,5	0,2	0,2	0,2
	BASF CM II 90	1,5	3,4	-1,0	0,9	62,2	0,2	0,2	0,2
	BASF CS II 90	1,4	3,7	-0,9	1,1	62,4	0,2	0,2	0,2
	BASF TP II 90	0,8	4,8	-0,1	1,6	60,5	0,2	0,1	0,2
	Fuji JP II 60	1,2	4,0	-0,9	-1,5	60,9	-0,2	0,3	0,4
	JVC UF II 90	1,5	3,7	-0,8	0,4	62,0	0,4	0,2	0,3
	Maxell XL II 60	1,1	3,8	-0,5	-0,1	61,4	0,4	0,2	0,2
	Maxell XL II S90	0,4	5,4	-0,3	2,2	60,5	2,3	0,2	0,2
	RAKS Carbrio 90	0,8	5,3	0,0	-2,0	61,0	-1,3	0,2	0,2
	RAKS SD-X 90	1,7	4,3	0,0	-1,7	59,6	-0,8	0,2	0,3
	RAKS SD-SX 60	0,7	5,1	0,0	-2,1	61,4	-1,1	0,2	0,3
	Sony UX 90	1,6	3,5	-0,7	-1,0	60,8	-0,6	0,2	0,2
	Sony UX-S 90	1,2	4,3	-1,0	1,0	62,0	0,6	0,2	0,2
	Sony UX-Pro 90	1,0	5,0	-0,2	1,1	60,3	2,4	0,2	0,2
	TDK SF 90	1,1	4,3	0,1	0,7	61,1	0,7	0,2	0,3
	TDK SA 90	1,1	4,3	0,0	0,8	61,4	0,4	0,2	0,2
TDK SA-X 90	0,8	4,9	1,0	2,6	61,5	2,5	0,2	0,3	
TDK SA-XS 90	0,9	5,0	1,0	2,6	62,2	2,2	0,2	0,2	
МЭК-4	Sony M-XR 90	1,0	5,5	0,1	1,4	57,9	1,5	0,1	0,2
	Sony SMM 90	0,4	7,7	1,8	2,4	57,4	3,0	0,2	0,3
	TDK MA 90	0,9	6,1	0,6	3,5	57,4	2,3	0,1	0,2
	TDK MA-X 60	1,1	6,3	0,0	3,2	57,8	0,3	0,1	0,2
	TDK MA-XG 90	0,5	5,5	0,5	3,3	58,3	1,8	0,2	0,2

Перегрузочная способность лент характеризуется протяженностью линейного участка характеристики передачи (рис. 2.9).

Характерная особенность магнитной записи — возникновение кубических искажений, так как наибольший вклад вносит третья гармоника. При сигнале, состоящем из суммы двух гармоник с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , продукты нелинейности, помимо гармоник  $3 \cdot f_1$  и  $3 \cdot f_2$ , содержат комбинационные тона с частотами  $|2 \cdot f_1 \pm f_2|$  и  $|2 \cdot f_2 \pm f_1|$ . Механизм возникновения такого рода искажений понятен из рис. 2.10, где последовательно показаны входной двухчастотный сигнал, сигнал на выходе УЗ и выделенная ВЧ-составляющая на выходе УВ.

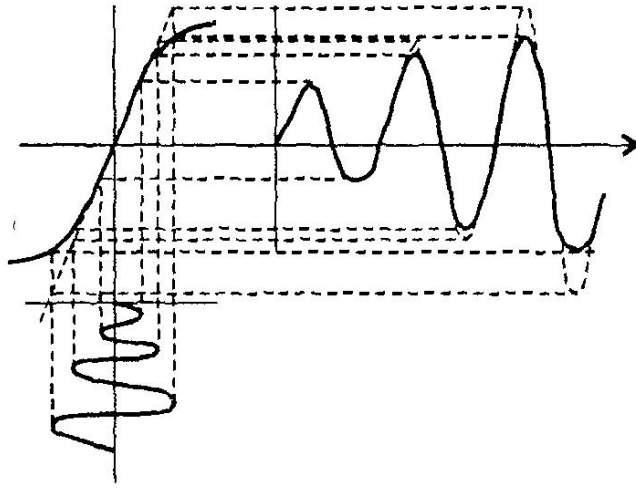


Рис. 2.9. Искажения записи при перегрузке

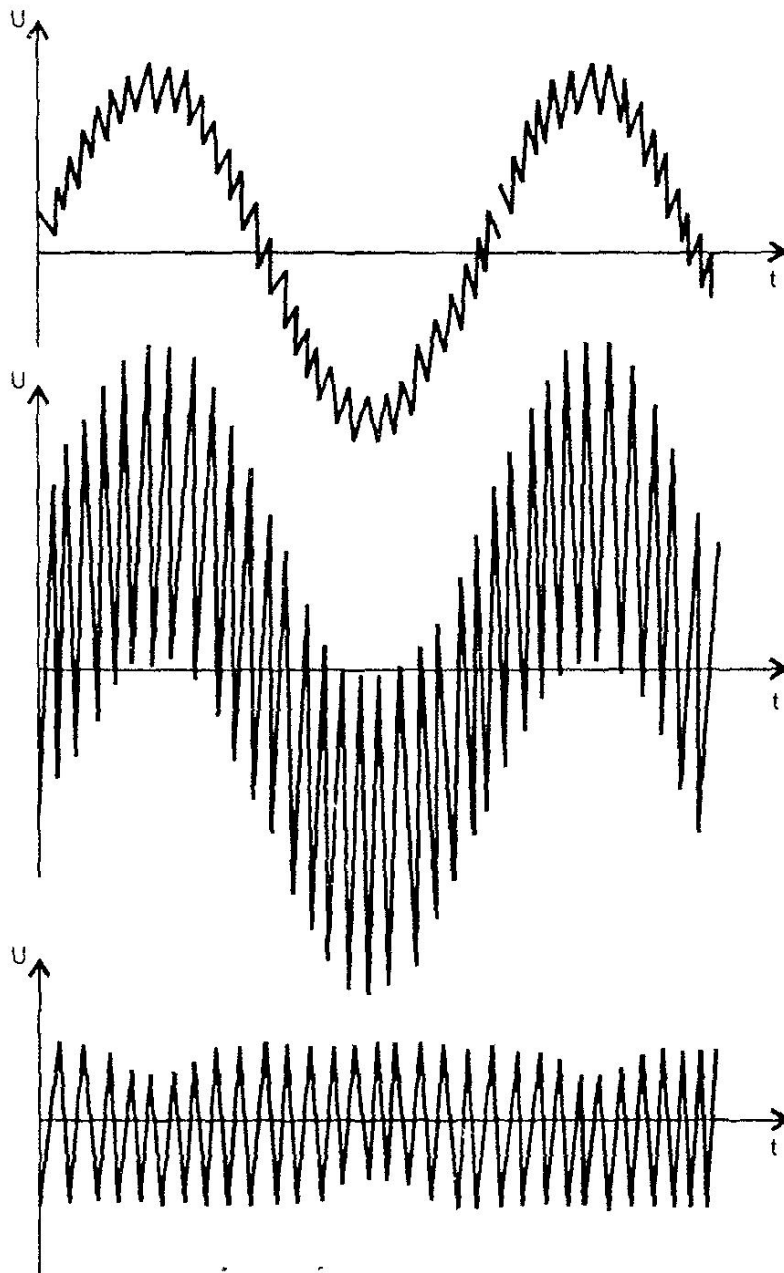


Рис. 2.10. Искажения при записи двухтонального сигнала

В реальном сигнале, состоящем из большого числа частотных составляющих, возникает достаточно сложный спектр комбинационных продуктов нелинейности.

Однако могут появиться и квадратичные искажения, если в головку записи попадает постоянная составляющая тока, или если головка записи намагничена. Стирание постоянным магнитом также приводит к квадратичным искажениям из-за остаточной намагниченности ленты, а, как известно, квадратичные искажения наиболее неприятны на слух. Поэтому во избежание квадратичных искажений усилители должны быть достаточно линейны, а головку записи и направляющие (касается катушечных магнитофонов) необходимо периодически размагничивать. Что касается нелинейности магнитных головок, то их нелинейность не превышает 0,2...0,4% и, как правило, практически не учитывается. Для исключения и этих искажений усилитель записи охватывают ООС не только по напряжению, но и по току записи [14].

## 2.4. Физические процессы записи/воспроизведения

Ток записи, проходя через катушку записывающей головки, создает в ее сердечнике изменяющийся по величине и направлению внутренний магнитный поток. Значительная часть этого потока, благодаря зазору и плотно прилегающей к нему ленте, выходит наружу и образует в рабочем слое ленты поле записи. В результате этого воздействия временные изменения мгновенных значений сигнала переходят в пространственные изменения намагниченности магнитной ленты, т.е. самопроизвольно намагниченные области — домены (элементарные магнитные носители) записи получают определенную фиксированную намагниченность. При этом длина волны сигналаграммы равна:

$$\lambda = \frac{V}{f}, \quad (2.1)$$

где:  $V$  — скорость движения ленты;  
 $f$  — частота записываемого сигнала.

В процессе воспроизведения записи происходит обратное преобразование — пространственные изменения намагниченности ленты переходят во временные изменения электрического напряжения.

Рабочий диапазон частот канала записи определяется в основном характеристиками магнитных лент, параметрами ГЗ и режимом подмагничивания. Для одного и того же типа лент могут отличаться:

- ♦ оптимальные токи подмагничивания — на  $\pm 2,5$  дБ;
- ♦ чувствительность — на  $\pm 2...2,5$  дБ;
- ♦ частотная характеристика — на  $\pm 3...5$  дБ.

### 2.4.1. Потери записи

Частотная характеристика процесса записи определяется по зависимости уровня намагниченности ленты от частоты тока записи при постоянной его величине. Если бы в процессе записи не возникали частотные и волновые потери, ее характеристика представляла бы прямую линию 1, параллельную оси частот (рис. 2.11). Реальная характеристика (кривая 2) имеет спад из-за потерь. Можно считать, что частотные предыскажения усилителя записи (УЗ) предназначены для компенсации потерь магнитной ленты. В этом случае АЧХ УЗ (кривая 3) должна быть зеркальна реальной характеристике, т.е. должна быть такой, чтобы при изменении частоты и постоянном уровне сигнала на входе канала записи обеспечивался стандартный уровень намагничивания для типовой ленты (ОСТ6-17-528-87).

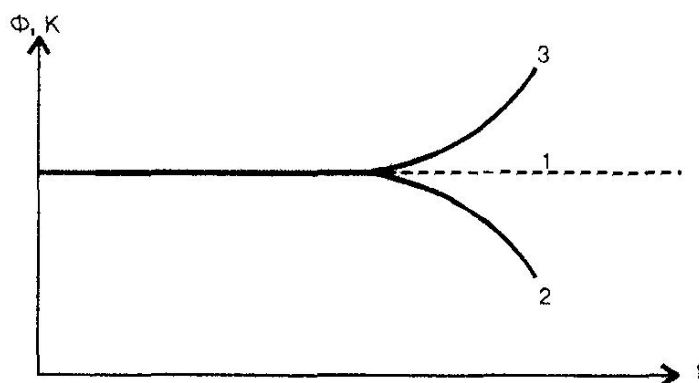


Рис. 2.11. Потери записи/воспроизведения (кривая 2) и предыскажения УЗ (кривая 3)

Основные потери записи следующие:

- ♦ фазово-волновые;
- ♦ от самоستيرаний;
- ♦ от саморазмагничивания.

Рабочий слой ленты намагничивается совместным действием полей тока записи и тока высокочастотного подмагничивания. В зависимости от уровня ВЧ-подмагничивания у выходной грани рабочего зазора головки возникает так называемая критическая зона (рис. 2.12), которая зависит как от тока подмагничивания, так и от самого тока записи и которая определяет волновые зависимости записи. Магнитная индукция в ленте после удаления ее от зазора уменьшается до значения остаточной индукции  $B_R$ .

В качестве ГЗ предпочтительнее использовать не универсальную головку, а записывающую, т.к. для записи необходим зазор, равный толщине рабочего слоя. При таком зазоре рабочий слой промагничивается на большую глубину и, кроме того, ослабляется размагничивающее действие полей рассеяния ВЧ-подмагничивания на высших частотах рабочего диапазона. В результате остаточная намагничен-

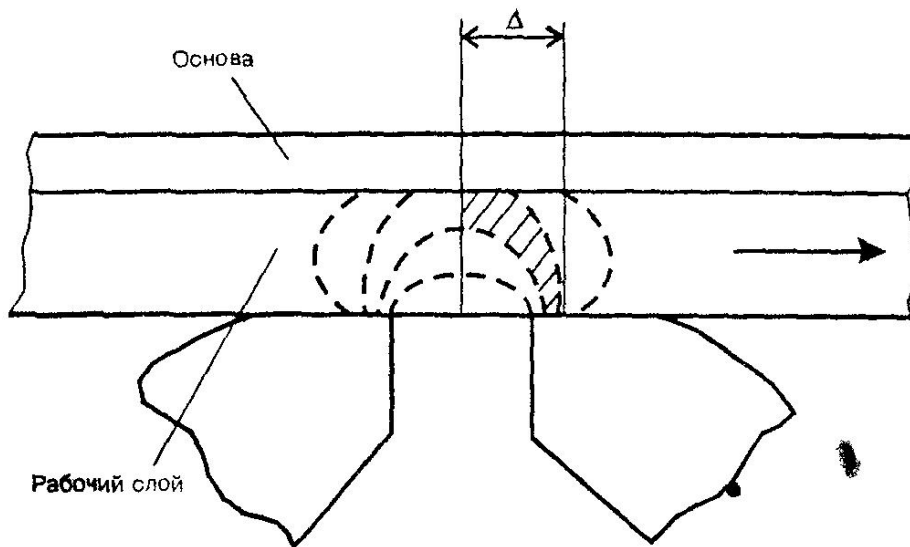


Рис. 2.12. Критическая зона записи

ность ленты в области частот 12...20 кГц с записывающей головкой получается на 2...3 дБ больше, чем с универсальной.

*Фазово-волновые потери* образуются вследствие того, что критическая зона имеет определенную протяженность. Чем короче длина волны сигнала, тем больше фазовый сдвиг магнитного потока в пределах критической зоны и тем значительнее уменьшение суммарной остаточной намагниченности данного участка рабочего слоя ленты. Этот завал волновой характеристики записи на высших звуковых частотах тем сильнее, чем больше токи сигнала и подмагничивания.

*Потери от самостирания* так же как фазово-волновые, связаны с временем прохождения критической зоны. Явление самостирания практически заметно при записи сигналов высших частот при относительно малых скоростях ленты. В этом случае для высокочастотных сигналов длина волны соизмерима с размерами поля ГЗ. Поле, создаваемое суммой токов записи и ВЧ-подмагничивания, значительно превышает геометрический размер рабочего зазора ГЗ. Это приводит к тому, что уже сформированный в зазоре ГЗ участок фонограммы ослабляется. Волны с малыми длинами почти полностью попадают в критическую зону перемагничивания и ослабляются сильнее волн со средними и большими длинами. Таким образом, максимальная частота записываемого сигнала (минимальная длина волны) определяется не геометрическим размером рабочего зазора ГЗ, а шириной критической зоны перемагничивания, которая в значительной степени зависит как от величины тока подмагничивания, так и от уровня самого тока записи. При этом полоса записываемых частот для сигналов разных уровней оказывается различной, а максимальный уровень записи ВЧ-составляющих — много ниже необходимого средне-статистического уровня, что приводит к недопустимо большим интермодуляционным искажениям ВЧ-сигналов с большим уровнем.

Т.о. это явление носит нелинейный характер и служит причиной дополнительных нелинейных искажений на высших частотах.

Одной из первых попыток серьезной борьбы с этим явлением было применение внешнего подмагничивания (способ Cross field) [15].

За счет меньшего размагничивания остаточная намагниченность ленты на высших частотах значительно возрастает. Так, еще на старой ленте «тип б» было возможным записать: на скорости 2,38 см/с — 13 кГц; на скорости 9,53 см/с — 25 кГц при  $K_3 = 2\%$ ; на скорости 19,05 см/с — 50 кГц при  $K_3 = 1\%$ .

При этом прочность записи высоких частот была значительно выше из-за большей степени намагниченности рабочего слоя ленты, более глубокого его промагничивания.

Применение этого способа возможно только в катушечных аппаратах, причем применение в стереофонических магнитофонах в чистом виде весьма затруднительно из-за сложности обеспечения стабильного по времени (из-за износа движущихся частей механизма подвода внешней головки и износа поверхности универсальной головки) тока подмагничивания, а также его регулировки. Поэтому промышленного применения этот способ не нашел, несмотря на высокую эффективность.

В нашей стране в свое время была широко известна разработка [16], в которой применено комбинированное подмагничивание: основное — внешнее, с помощью обычной стирающей головки, и до оптимального — обычным способом.

В связи с этим способом подмагничивания вспоминается эпизод почти двадцатилетней давности. В то время меломаны писали в основном на 19-й скорости. В моем магнитофоне УЗ был выполнен с основным внешним подмагничиванием и дополнительным встречно-параллельным, что позволяло производить записи на 9-й скорости превосходящие по качеству записи, сделанные на 19-й скорости обычными магнитофонами. В качестве проигрывателей грампластинок широко использовались популярные в то время вертушки «ВЕГА-206» и им подобные с УК низкого качества. В моем проигрывателе он был заменен на УК, описанный в [17].

Однажды я взял у своего знакомого послушать венгерский диск «Neoton familia». При возвращении диска я предложил товарищу прослушать сделанную запись. Сначала он скептически отнесся к моему предложению, узнав, что запись сделана на 9-й скорости. Прослушав несколько фрагментов, он неожиданно выключил магнитофон, достал пластинку и включил проигрыватель. Он по несколько раз прослушивал фрагменты то с магнитофона, то с проигрывателя, потом с удивлением заявил: «Не могу поверить своим ушам, запись звучит лучше оригинала!».

Перегрузочная способность лент во многом зависит от соотношения тока подмагничивания и тока записи. В самом деле, чем больше отношение номинального тока подмагничивания к номинальному току записи, тем меньше его изменение при перегрузке, а соответ-

ственно, меньше и увеличение критической зоны. Этим, в частности, можно объяснить повышенную перегрузочную способность МЭК-2 и тем более МЭК-4 на высших частотах, для которых ток записи больше примерно в 1,2 и 1,5 раза, а ток подмагничивания — в 1,5...2 раза и 3 раза, соответственно (см. табл. 2.3).

Это соотношение различно не только для разных типов лент, но и для разных головок. В соответствии с картой номинальных токов подмагничивания [18] головки условно, в порядке убывания соотношения  $I_n/I_z$ , разбиты на 5 групп (табл. 2.7).

Отношение номинального тока подмагничивания к номинальному току записи для некоторых типов головок

Таблица 2.7

Группа	$I_n/I_z$	Головка
I	>12	Sankyo 555-20, ALPS HD424 PVJ, CANON 56701
II	12..10	National WY1403, Sankyo 223-20, ЗД24 942
III	10...8	CANON 3331, Sankyo 569-11, ЗД24.941, CANON H2331
IV	8 ..6	ALFA HY424 SVS, ЗAB24.010, CANNON 2334, Sankyo 311-10, CANON 2349, ЗД24.080
V	<6	ЗД24.221, ALPS HD428801, ЗД24 051, ЗД24.112, ЗД24.232

Потери от саморазмагничивания непосредственно связаны с небольшими размерами полуволновых областей при записи коротких волн. Подобно тому, как остаточная намагниченность ферромагнитного бруска значительно больше при намагничивании в продольном направлении по сравнению с намагничиванием в поперечном направлении, так и остаточная намагниченность длинных полуволновых областей больше, чем коротких. Вследствие примыкания элементарных магнетиков друг к другу одноименными полюсами (рис. 2.13), внутри рабочего слоя ленты как бы создается размагничивающее намагничивание носителя записи. Поэтому чем короче длина волны записи  $\lambda$ , тем меньше продольный размер элементарного магнетика  $l = 0,5 \cdot \lambda$  и, следовательно, тем сильнее размагничивающее поле. У современных магнитных лент эти потери уступают остальным.

Следующий путь расширения перегрузочной способности носителей в области высших частот звукового диапазона заключается в динамической оптимизации тока подмагничивания. Различают несколько видов динамического подмагничивания:

- ♦ динамическое подмагничивание;
- ♦ адаптивное динамическое подмагничивание;
- ♦ параметрическое динамическое подмагничивание;
- ♦ встречное подмагничивание пилообразным напряжением (током).

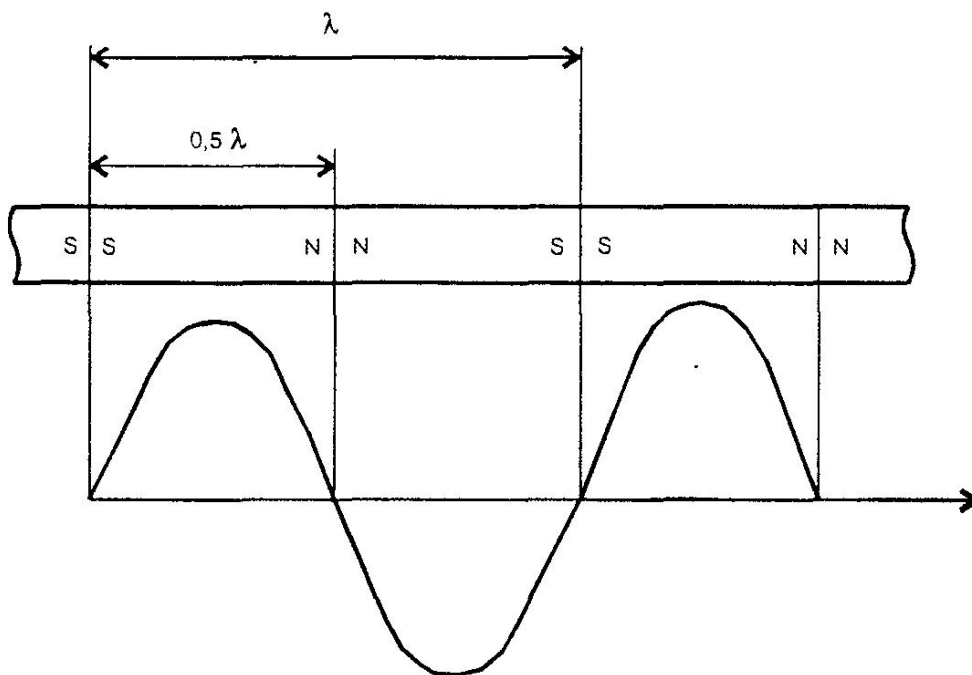


Рис. 2.13. Намагниченность ленты в продольном направлении

Частотные потери головки записи — потери, связанные с бесполезным расходом энергии на вихревые токи и на гистерезис в сердечнике, экране и металлической арматуре головки записи. Для уменьшения этих потерь сердечники изготавливают из материала с большим удельным сопротивлением и узкой петлей гистерезиса. В качестве прокладок в рабочем и дополнительном зазорах применяют изоляционные материалы, например, стекло или слюду, увеличивают ширину дополнительного зазора. В основном зазоре иногда применяют бериллиевую бронзу, применение же токопроводящих материалов в дополнительном зазоре недопустимо из-за дополнительных потерь на вихревые токи. Для современных записывающих головок частотные потери превышают 1 дБ на верхнем пределе рабочего диапазона частот.

Примерный ход АЧХ усилителя записи приведен в табл. 2.8.

Примерный ход АЧХ усилителя записи

Таблица 2.8

Частота, кГц	0,4	1	2	4	6	8	10	12,5	14	16
Подъем АЧХ, дБ	0	0,2	0,7	2,3	5,3	7,7	10,5	14	16	17

Из таблицы видно, что подъем АЧХ на частотах 10 и 12 кГц соответствует потерям, приведенным в табл. 2.3, 2.4.

## 2.4.2. Потери воспроизведения

АЧХ воспроизведения (рис. 2.14) определяют по зависимости ЭДС воспроизводящей головки от частоты сигналов, записанных с постоянным уровнем (обычно — минус 20 дБ) на магнитной ленте.

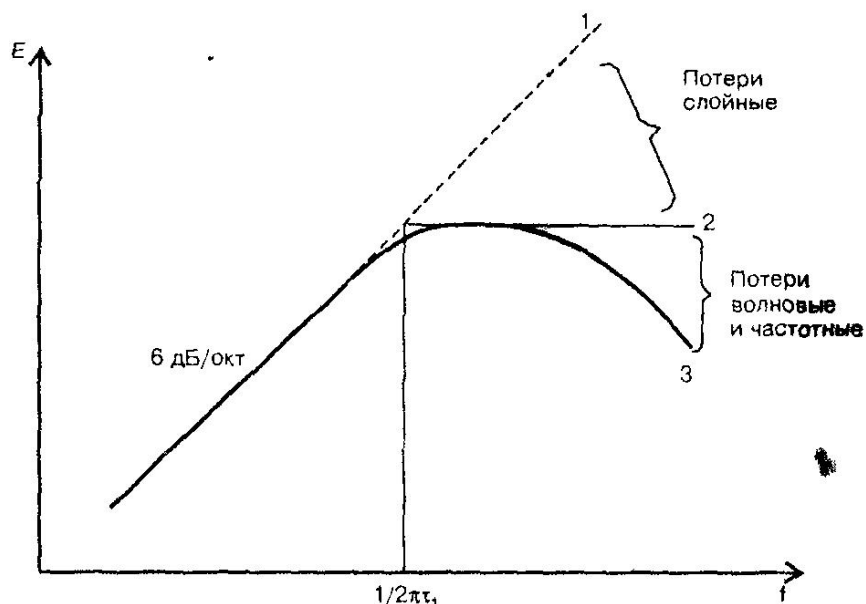


Рис. 2.14. Потери АЧХ воспроизведения

Отдача  $E$  — ЭДС, индуцируемая в обмотке головки при воспроизведении сигналограммы с определенной намагниченностью и частотой, определяется формулой:

$$E = 2\pi f n \Phi \frac{\sin \pi \frac{\delta_g}{\lambda}}{\pi \frac{\delta_g}{\lambda}}, \quad (2.2)$$

где:  $f$  — частота воспроизводимого сигнала;

$n$  — число витков обмотки;

$\lambda$  — длина волны записи;

$\Phi$  — магнитный поток фонограммы (магнитный поток ленты, входящий в головку);

$\delta_g$  — эффективная ширина рабочего зазора (обычно на 10...20% превышает геометрическую ширину из-за неидеальности ребер зазора, а также из-за влияния глубины зазора на распределение поля головки, зависит также и от наклона головки).

Множитель в виде дроби характеризует частотные искажения, вносимые рабочим зазором. Этот множитель показывает, что при уменьшении длины волны записи ЭДС головки уменьшается, и при  $\delta_g = \lambda$  ЭДС головки воспроизведения будет равна нулю.

Чем выше ЭДС, тем лучше будет отношение сигнал/шум канала воспроизведения. Основные потери воспроизведения по значимости располагаются в следующем порядке:

- ♦ слойные;
- ♦ волновые (щелевые, контактные, из-за перекоса зазора);
- ♦ частотные (потери шунтирования, перемагничивания сердечника).

Слойные потери образуются вследствие того, что толщина рабочего слоя ленты  $d$  конечна. Эти потери зависят от относительной удаленности от сердечника ГВ элементарных слоев ленты. Графически этот вид потерь показан на рис. 2.15.

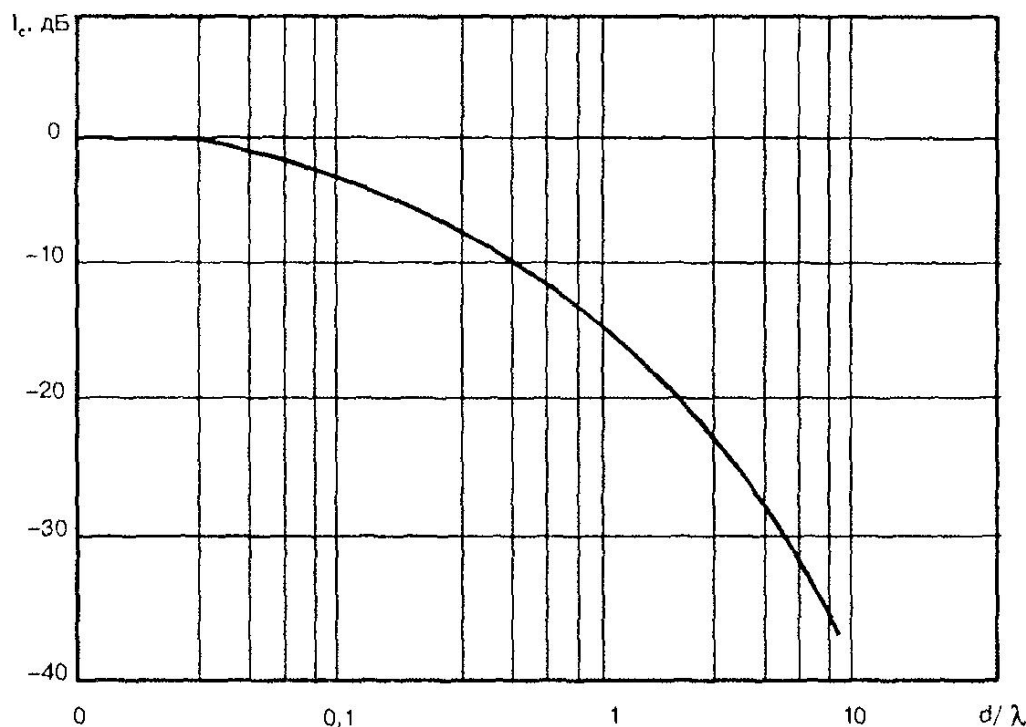


Рис. 2.15. Зависимость слойных потерь от отношения толщины рабочего слоя ленты к длине волны сигнала

Из графика видно, что потери возрастают, как с ростом толщины рабочего слоя ленты, так и с уменьшением длины волны сигнала. Отсюда ясно, что на малых скоростях движения ленты тонкие ленты предпочтительнее. На больших же скоростях применение чрезмерно тонких лент нецелесообразно, т.к. падает отдача ленты и вследствие этого ухудшается отношение сигнал/шум. Кроме того, тонкая основа лент способствует повышенному копирэффекту. Слойные потери в принципе неустранимы, т.к. рабочий слой всегда имеет конечную толщину.

Волновые потери определяются зависимостью величины магнитного потока в сердечнике ГВ от длины волны записи. Изменение скорости ленты и частоты сигнала в одинаковое число раз не изменяет длину волны записи, а следовательно, и связанные с ней основные особенности процессов воспроизведения и записи. С этой точки зрения, например, безразлично, записывается ли сигнал частотой 1000 Гц при скорости 4,76 см/с или 2000 Гц при скорости 9,53 см/с (к вопросу об ускоренной перезаписи), т.е. волновые потери будут одинаковы.

Щелевые потери появляются из-за соизмеримости длины волны записи с шириной рабочего зазора воспроизводящей головки. Ослаб-

ление потока в головке происходит вследствие взаимной компенсации (нейтрализации) магнитных потоков элементарных магнетиков, т.к. у краев зазора располагаются одноименные магнитные полюса (см. рис. 2.13). Полная компенсация происходит при величине зазора, равной или кратной длине волны, т.е. при  $\delta = n\lambda$ , где  $n = 1, 2, 3\dots$

Щелевые потери подчиняются выражению:

$$P_{щ} = \frac{\left| \sin \frac{\pi \delta_g}{\lambda} \right|}{\left( \frac{\pi \delta_g}{\lambda} \right)}, \quad (2.3)$$

$$\delta_g = \frac{V}{f_0}, \quad (2.4)$$

где  $\delta_g$  — эффективная ширина рабочего зазора;

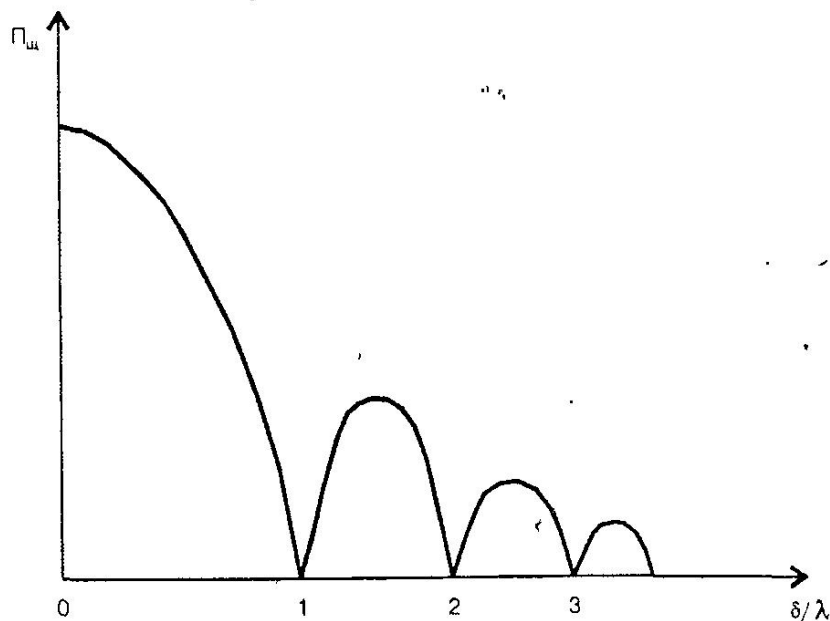
$f_0$  — частота первого минимума отдачи при измерении АЧХ воспроизведения.

Графически этот вид потерь показан на рис. 2.16.

Для уменьшения щелевых потерь ширину рабочего зазора ГВ выбирают из условия:

$$\delta \approx \frac{\lambda_B}{2}, \quad (2.5)$$

где  $\lambda_B$  — длина волны, соответствующая высшей частоте рабочего диапазона записи  $f_B$ .



**Рис. 2.16.** Зависимость щелевых потерь от отношения ширины рабочего зазора к длине волны

Тогда наивысшая воспроизводимая головкой частота из формулы (2.1):

$$f_B = \frac{V}{\lambda_B} = \frac{V}{2\delta}. \quad (2.6)$$

Следовательно, чтобы воспроизводить полосу частот до 16 кГц при скорости ленты 4,76 см/с, ширина зазора ГВ должна быть:

$$\delta = \frac{V}{2f} = \frac{47,6}{2 \cdot 16000} = 0,0015 \text{ мм} = 1,5 \text{ мкм}.$$

Этому требованию удовлетворяют практически все современные головки, как воспроизводящие, так и универсальные, т.к. имеют зазоры от 0,8 до 1,5 мкм.

*Контактные потери* (определяются неплотным прилеганием ленты к магнитной головке) ориентировочно рассчитывают по формуле:

$$P_K = \frac{55 \cdot a}{\lambda}, \text{ дБ}, \quad (2.7)$$

где:  $a$  — расстояние между лентой и головкой, мкм;

$\lambda$  — длина волны записи, мкм.

С уменьшением длины волны (т.е. с ростом частоты) растут и потери. Эти потери могут быть высоки из-за неправильной установки головки, если имеется «кивок» головки (наклон) вперед или назад. К возрастанию потерь приводит износ краев ленты, а также ее деформация:

- ♦ в виде сабельности (результат проигрывания кассет в магнитофоне с неправильно отрегулированным прижимным роликом);
- ♦ желобообразная — вследствие контакта с головкой, имеющей недопустимый износ (выработку).

Этот вид потерь может носить и периодический характер, например, при неравномерности торможения подающего узла, что проявляется в паразитной амплитудной модуляции сигнала.

*Потери из-за перекоса* возникают вследствие непараллельности рабочего зазора головки воспроизведения магнитному штриху на ленте. Перекос эквивалентен расширению рабочего зазора ГВ (рис. 2.17) до величины:

$$\delta_g = b \cdot \operatorname{tg}\alpha, \quad (2.8)$$

где  $b$  — ширина дорожки записи;

$\alpha$  — угол перекоса.

Из формулы ясно, что, чем шире дорожка записи, тем больше могут быть потери из-за перекоса.

Все рассмотренные выше потери связаны с малой длиной волны. Однако и на длинных волнах (на низших частотах) из-за соизмеримости длины волны записи и размеров рабочей поверхности ГВ

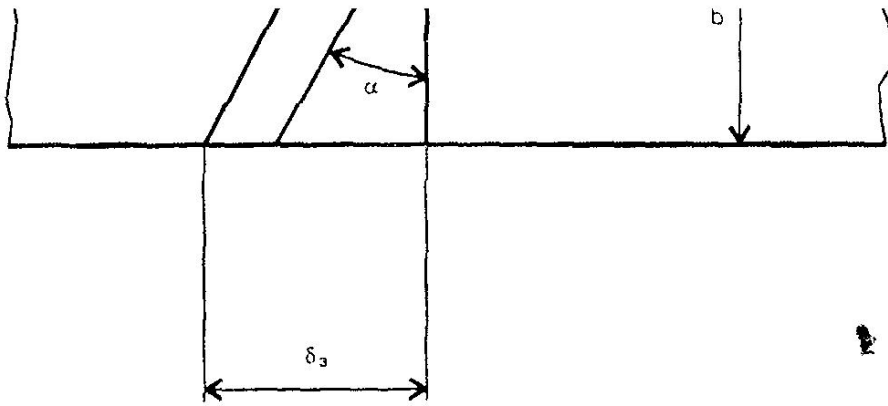


Рис. 2.17. Потери из-за перекоса рабочего зазора головки

(точнее поверхности контакта с лентой) возникают волновые искажения типа «змейки».

На рис. 2.18 представлены два распределения магнитного потока в сердечнике головки. В первом из них, при  $L = \lambda$ , магнитный поток увеличивается, во втором, при  $L = 2\lambda$  — уменьшается. В зависимости от конструкции сердечника воспроизводящей головки увеличение потока может также наблюдаться при  $L = (3, 5, \dots)\lambda$ , а уменьшение (помимо  $2\lambda$ ) — при  $L = (4, 6, \dots) \cdot \lambda$ .

Для устранения этого вида потерь магнитные головки желательно делать с  $L > \lambda_H$  что практически всегда выдерживается, где  $\lambda_H$  — длина волны, соответствующая нижней частоте  $f_H$  рабочего диапазона:

$$\lambda_H = \frac{V}{f_H} = \frac{47,6}{31,5} = 1,5 \text{ мм.}$$

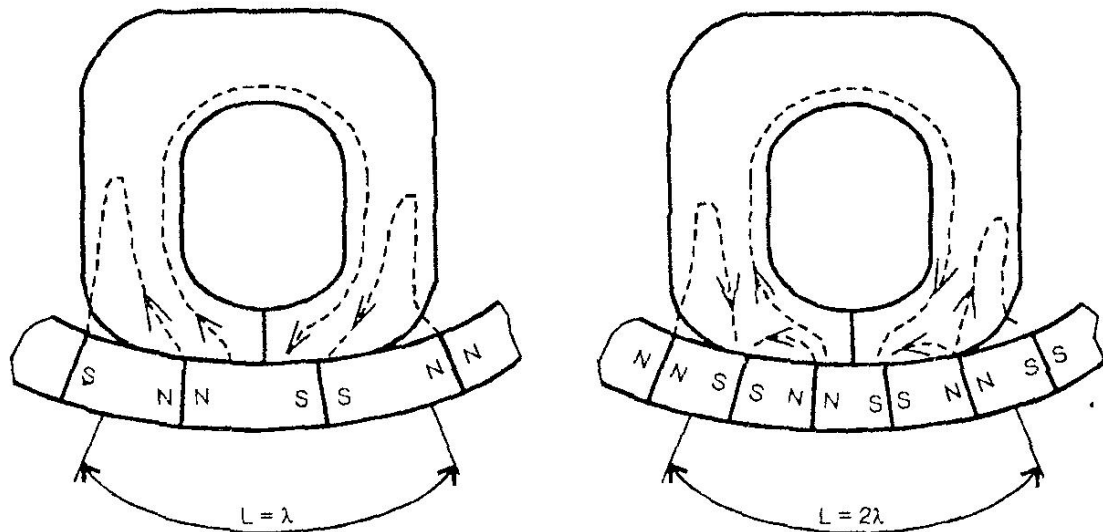


Рис. 2.18. Два варианта распределения магнитного потока в сердечнике магнитной головки: при  $L = \lambda$  и при  $L = 2\lambda$

Лента должна плавно отходить от поверхности головки, экраны должны быть удалены от нее на достаточное расстояние.

Частотные потери (рис. 2.14, кривая 3) вызываются расходом энергии в сердечнике и арматуре головки и пропорциональны частоте сигнала. Частотная характеристика канала воспроизведения должна быть такой, чтобы при стандартном потоке выходной уровень сигнала УВ при изменении частоты сохранялся постоянным. Этому требованию удовлетворяет характеристика (рис. 2.19), зеркальная кривой 3 (рис. 2.14).

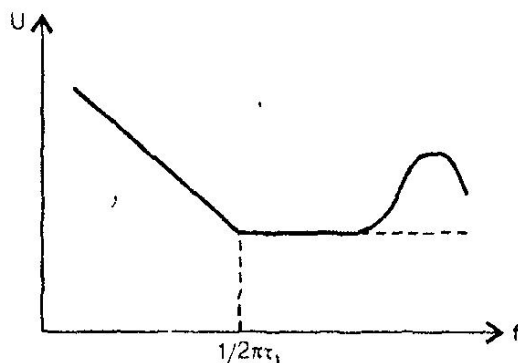


Рис. 2.19. Частотные потери

Причем для полной совместимости фонограмм для скорости 4,76 см/с приняты две постоянные времени:  $\tau_1 = 120$  мкс (для лент типа МЭК-1) и  $\tau_1 = 70$  мкс (для остальных типов лент), определяющие частоту первого перегиба коррекции потерь: 1326 Гц и 2274 Гц, соответственно. Вторая частота перегиба, в зависимости от качества ГВ, находится в пределах 8...12 кГц.

При уменьшении  $\tau_1$  снижается частотная коррекция в усилителе воспроизведения, подчеркивающая наиболее слышные частотные составляющие шумов паузы. В пределе (при  $\tau_1 = 0$ ) АЧХ стандартного канала воспроизведения соответствует зависимости «-6 дБ/окт», а шумы минимальны. Однако, при уменьшении  $\tau_1$ , т.е. уменьшении частотной коррекции, должны быть соответственно увеличены предыскажения в усилителе записи, что вызывает чрезмерное увеличение нелинейных искажений на высоких частотах из-за перегрузки ленты, т.к. и без этого уровень тока записи ВЧ-составляющих сигнала примерно равен току на низших и средних частотах (с учетом их заниженного на 15...20 дБ уровня и примерно такого же подъема в УЗ — см. табл. 2.8). Уменьшение при этом уровня записи невыгодно из-за уменьшения отношения сигнал/шум на средних частотах, в основном определяющих громкость сигнала.

При увеличении  $\tau_1$  происходят обратные явления: возрастают шумы и уменьшаются нелинейные искажения.

Потери шунтирования связаны с тем, что часть магнитного потока фонограммы замыкается не в сердечнике головки, а через рабочий зазор и пространство между полюсными наконечниками. Данные потери зависят не от длины волны записи, а от частоты сигнала. С ростом частоты магнитная проницаемость сердечника падает, а сопротивление магнитному потоку возрастает, что ведет к перераспределению потока и увеличению потерь.

## 2.5. Характеристики движения магнитной ленты

Основная функция лентопротяжного механизма (ЛПМ), непосредственно связанная с процессом записи/воспроизведения, — равномерное перемещение носителя записи по рабочей поверхности магнитных головок.

Для неискаженной передачи сигнала необходимо, чтобы скорость ленты при записи  $V_3$  равнялась скорости при воспроизведении  $V_B$ . При этом совпадают соответствующие частоты исходной и воспроизводимой фонограмм, т.е. отсутствуют частотные искажения. Однако в действительности указанные скорости по разным причинам могут отличаться друг от друга, вызывая тем самым изменение частоты воспроизводимого сигнала. Слух человека замечает такие изменения, если они превышают 1...2%, а в некоторых случаях, например, при склейке фонограмм, записанных в начале и конце рулона или на разных магнитофонах, граница слышимости может быть еще ниже.

Для характеристики движения ленты по тракту ЛПМ используют следующие показатели:

- ♦ номинальная скорость  $V_0$ ;
- ♦ средняя скорость  $V$ ;
- ♦ величина дрейфа  $\Delta V$ ;
- ♦ коэффициент колебаний скорости  $K_C$ ;
- ♦ коэффициент детонации  $K_D$ ;
- ♦ коэффициент амплитудной модуляции  $K_{AM}$

Номинальные скорости движения ленты оговорены стандартом [19].

*Средняя скорость* — это постоянная составляющая скорости ленты. Разница между значениями номинальной и средней скорости свидетельствует об отклонении скорости ленты от нормы.

На практике обычно ограничиваются измерением скоростей в начале и конце ленты, они должны укладываться в пределы допуска, а величина разности между ними называется дрейфом. Величина дрейфа не должна выходить за полные пределы отклонений скорости от номинала.

### Детонация

Более быстрые колебания скорости приводят к паразитной частотной модуляции, а вызванные ею искажения — называют детонацией и оценивают с помощью коэффициента детонации.

Медленные колебания скорости, примерно до 3...4 Гц, прослеживаются по изменению высоты тона. Более быстрые, приблизительно до 20 Гц, прослушиваются как вибрация, трель, дребезжание. Еще более быстрые приводят к хриплости звучания. Наиболее заметны искажения, модулирующие частоты которых находятся в пределах 3...6 Гц.

Исследования показывают, что порог слышимости детонации в зависимости от характера воспроизводимого сигнала лежит в пределах 0,1...0,15%. Действующим стандартом [19] нормируются коэффициенты детонации от  $\pm 0,1\%$  для магнитофонов нулевой группы сложности до  $\pm 0,4\%$  для четвертой группы.

### Паразитная амплитудная модуляция

Паразитная амплитудная модуляция возникает из-за переменного контакта ленты с магнитными головками и неоднородности структуры ленты. Порог слышимости ПАМ на гармонических сигналах равен примерно 1%, а при воспроизведении музыки и речи может находиться выше 15% [20].

ПАМ сильно возрастает, если лента имеет повышенную сабельность, коробление, потянутые края, а тем более, если имеет «зажеванные» участки. Преобладание в спектре ПАМ низкочастотных составляющих (1 Гц) приводит к плаванию громкости или «выпадению» сигнала. Высокочастотная (до 10...20 Гц) ПАМ воспринимается как амплитудное вибрато. Еще более высокочастотные составляющие — как хриплое звучание.

Поскольку наибольшая чувствительность слуха находится в области частот от 1 до 5 кГц, коэффициент детонации принято измерять на частоте 3150 Гц. Коэффициент амплитудной модуляции  $K_{AM}$  стандартом не нормируется. На величину детонации и ПАМ в первую очередь влияют конструктивные особенности ЛПМ, а также качество его настройки, которое должно обеспечить оптимальные значения основных факторов:

- ♦ степень натяжения ленты;
- ♦ параллельность оси прижимного ролика оси тонвала;
- ♦ крутящий момент подмотки;
- ♦ правильность установки головок по высоте и наклону.

Правильность установки головок и работы прижимного ролика удобно смотреть с помощью зеркальной кассеты (рис. 2.20).

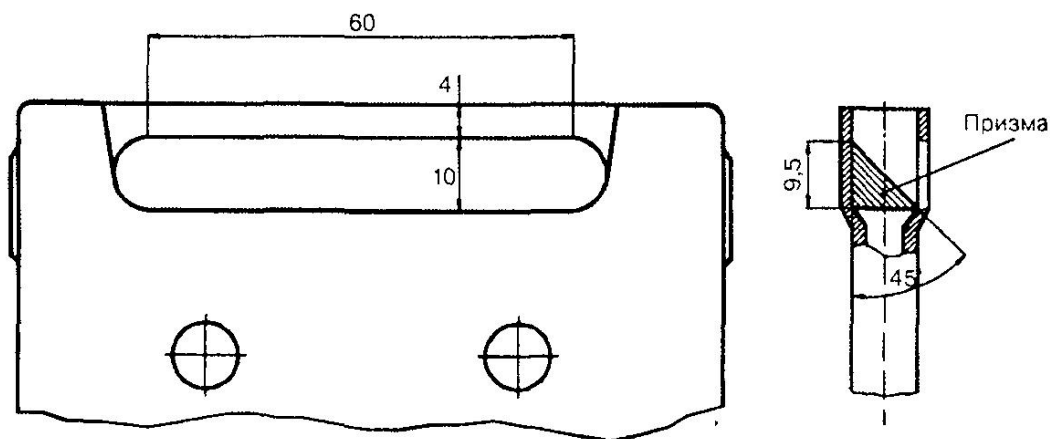


Рис. 2.20. Конструкция зеркальной кассеты

Изготавливают ее из обычной разборной кассеты следующим образом. В верхней половине выфрезеровывают окно в соответствии с рисунком. В нижней — устанавливают зеркальную (отхромированную и отполированную) призму. В простейшем варианте — с помощью пластилина под углом  $45^\circ$  закрепляют полоску тонкого зеркала.

## 2.6. Выводы

По ходу изложения материала уделено достаточно внимания разного рода искажениям. Коротко подведем итоги.

1. На средних и низких частотах нелинейность амплитудной характеристики канала записи выражается в появлении нечетных гармоник основного сигнала, из которых основную роль играет 3-я.
2. При неизменном токе записи зависимость  $K_3$  от частоты записываемого сигнала равномерна до точки, в которой частота третьей гармоники  $f_3 = 3f_1$  имеет заметные потери записи и воспроизведения. Уменьшение  $K_3$ , измеренного на высоких частотах, не означает, однако, уменьшения слышимых нелинейных искажений. Если искажения на низких и средних частотах проявляются как «хрип», «дребезжание» и т.п., то на высоких появляются весьма неприятные комбинационные искажения, составляющие которых расположены в рабочем диапазоне.
3. Одной из основных величин, определяющих качество записи, является ток подмагничивания. От него зависит как полезная отдача фонограммы, так и степень искажения формы записываемого сигнала, уровень шумов и частотная характеристика записи.
4. Для обеспечения запаса по перегрузочной способности на средних частотах, нулю децибел индикатора уровня записи (наиболее распространенный индикатор средних значений) на частоте 1 кГц должен соответствовать уровень, меньший предельно допустимого на 6...9 дБ, т.е. на величину коэффициента амплитуды (отношение пикового уровня сигнала к среднему) реального музыкального сигнала.
5. Источником повышенных нелинейных искажений и шума может стать генератор тока подмагничивания. Из-за его асимметрии характеристика намагничивания ленты также становится асимметричной, что приводит к появлению квадратичных искажений. Подобные искажения могут быть вызваны случайным намагничиванием ГЗ, а также в результате стирания ленты постоянным магнитом.
6. В качестве ГЗ предпочтительнее использовать не универсальную головку, а записывающую, т.к. при записи необходим

зазор, равный толщине рабочего слоя. Дополнительный зазор линейаризирует ее характеристику намагничивания, что снижает искажения сигнала. Остаточная намагниченность ленты в области частот 12...20 кГц с записывающей головкой получается на 2...3 дБ больше, чем с универсальной.

7. Коррекция АЧХ сквозного канала изменением тока подмагничивания допустима в пределах от  $-2$  до  $+3$  дБ от оптимального. После чего необходимо проверить  $K_3$  на средних частотах при номинальном уровне записи.
8. Что касается усилителя воспроизведения, то, по мнению автора, наилучшие результаты получаются при использовании в УВ специально разработанной для этой цели микросхемы К157УЛ1. В отличие от других схем шумы данного усилителя носят ровный и «спокойный» характер. Микросхема достаточно широкополосна, коэффициент усиления без ООС на частоте 20 кГц немногим уступает усилению на частоте 400 Гц. Входной каскад усилителя конструктивно оптимизирован по отношению сигнал/шум в полосе частот 20...20000 Гц для работы его от магнитной головки.

## 2.7. Улучшение основных параметров магнитофона

### Устройства шумопонижения

Все известные устройства шумоподавления можно отнести к двум группам:

- ♦ устройства однократного воздействия, работающие лишь при воспроизведении или при записи;
- ♦ устройства, основанные на двукратной обработке сигнала (соответственно, при записи и при воспроизведении).

К первой группе можно отнести пороговые шумоподавители, различного рода динамические ограничители шума: DNL (Dynamic Noise Limiter) фирмы PHILIPS, отечественную систему шумопонижения типа «Маяк» (К157ХП3) и др.

Ко второй группе относятся различного рода компандерные устройства, а также безынерционные шумоподавители, основанные на подъеме на 5...6 дБ полосы частот в районе 4 кГц (область наибольшей чувствительности слуха) при записи и на зеркальном понижении этой же полосы частот при воспроизведении.

Наиболее известные из компандерных устройств шумоподавители Dolby по имени американского инженера и dbx (David Blacmer Excellence), позволяющие довести реальный динамический диапазон кассетного магнитофона до 85...90 дБ.

К недостаткам систем Dolby можно отнести то, что для восстановления исходной АЧХ фонограммы они требуют строго определенного уровня на входе устройства при воспроизведении.

### Влияние тока подмагничивания

Значение тока подмагничивания влияет не только на нелинейные искажения, волновые потери (АЧХ записи), но и на модуляционные шумы. Поэтому выбор его величины осуществляется на основе компромисса между указанными показателями.

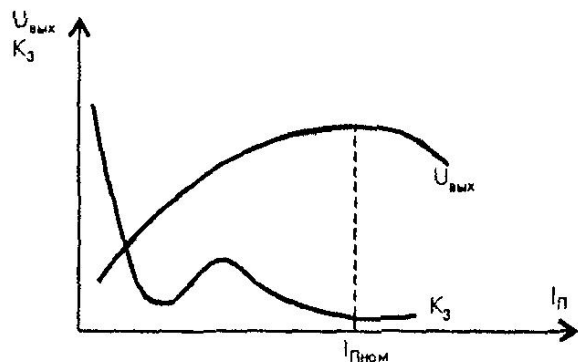


Рис. 2.21. Зависимость уровня записи и коэффициента третьей гармоники  $K_3$  от тока подмагничивания

Из-за различия характеристик подмагничивания для длинных и коротких волн записи оптимальные токи подмагничивания для длинных волн имеют большее значение, чем для коротких (см. рис. 2.4). Близкие к минимальным значениям модуляционного шума и нелинейных искажений на низких и средних частотах обеспечиваются при подмагничивании, оптимальном для длинных волн записи. Зависимость уровня записи и коэффициента третьей гармоники  $K_3$  от тока подмагничивания показана на рис. 2.21.

Оптимальное подмагничивание для данного типа ленты позволяет получить при записи наилучшее соотношение сигнал/помеха (за счет выбора максимального уровня записи при приемлемых искажениях) и минимальные искажения.

Уменьшение уровня модуляционного шума при подмагничивании, несколько большем, чем оптимальное, можно объяснить следующим. Определенная часть модуляционного шума вызвана паразитной амплитудной модуляцией основного сигнала из-за нестабильности механического контакта между магнитной лентой и записывающей головкой. При этом при отдалении ленты от головки ослабляется как поле основного сигнала, так и поле подмагничивания, что приводит к автоматической стабилизации уровня записи. Этот эффект с успехом использовали в катушечных магнитофонах, устанавливая номинальный ток подмагничивания на 2 дБ больше оптимального.

Шумы паузы получают на выходе усилителя магнитофона при воспроизведении участка фонограммы, записанного с подключенным ко входу УЗ резистором, эквивалентным номинальному сопротивлению источника сигнала. При этом регуляторы уровня записи должны находиться в положении, соответствующем номинальному уровню записи. В магнитофонах с АРУЗ запись паузы производят в течение 5 с после прекращения подачи опорного сигнала. На величину шума паузы влияют как величина, так и частота тока подмагничивания.

Чем больше его величина и чем выше частота, тем уровень шума паузы меньше. При уровне, примерно равном половине оптимального, уровень шума максимален, что отражено на графике (рис. 2.4). Замечено также, что шумы размагниченной ленты, не подвергнутой воздействию поля подмагничивания записывающей головки, обычно на 6...7 дБ меньше шумов ленты, подвергнутой этому воздействию. Это объясняется тем, что в присутствии ВЧ-подмагничивания лента обладает повышенной чувствительностью и воспринимает действие даже очень слабых полей (например, двигателя), в том числе и поля земли. Кроме того, на ленту также записывается шум усилителя записи и эквивалентного сопротивления входа (источника сигнала).

На основании вышеизложенного можно предложить два пути снижения шума пауз:

- ♦ прекращение подмагничивания в паузах фонограммы;
- ♦ увеличение подмагничивания в паузах на 2...3 дБ.

На первом принципе (прекращении подмагничивания в паузах фонограммы) работает шумоподавитель (рис. 2.22) [21].

Шумы и помехи (щелчки и потрескивания грампластинок, вызванные пылью и микроцарапинами) не записываются, благодаря низкой чувствительности процесса записи без ВЧ-подмагничивания.

Шумоподавление в катушечных магнитофонах составляло 8...9 дБ и 4...5 дБ в кассетных. Еще больше эффективность шумопонижения в магнитофонах с АРУЗ, в которых время восстановления выбрано средним между оптимальным для записи речи (2...5 с) и записи музыки — не менее 20 с. При этом входы устройства шумопонижения необходимо подключать не к выходу усилителя записи (УЗ), а к его входу. На разделении каналов это практически не сказывается, т.к. выходное сопротивление источника сигнала, как правило, не превышает 1 кОм.

Устройство изменяет ток ВЧ-подмагничивания не скачкообразно, а плавно и симметрично для обеих полуолн, что предотвращает

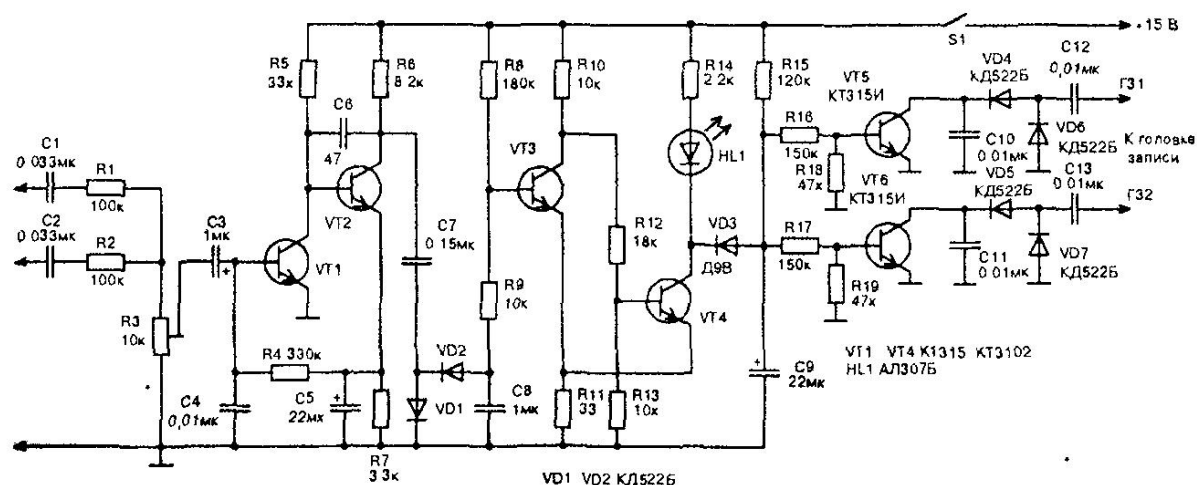


Рис. 2.22. Шумоподавитель пауз записи

паразитное намагничивание сердечника записывающей головки и даже способствует ее размагничиванию при случайном намагничивании и снижает заметность изменения шума в паузах.

Время срабатывания (снижения ВЧ-подмагничивания до минимума) — 0,5 с, время восстановления составляет около 4 мс.

Налаживание устройства сводится к установке порога чувствительности резистором R3.

Возможный вариант печатной платы и сборочный чертеж устройства показан на рис. 2.23.

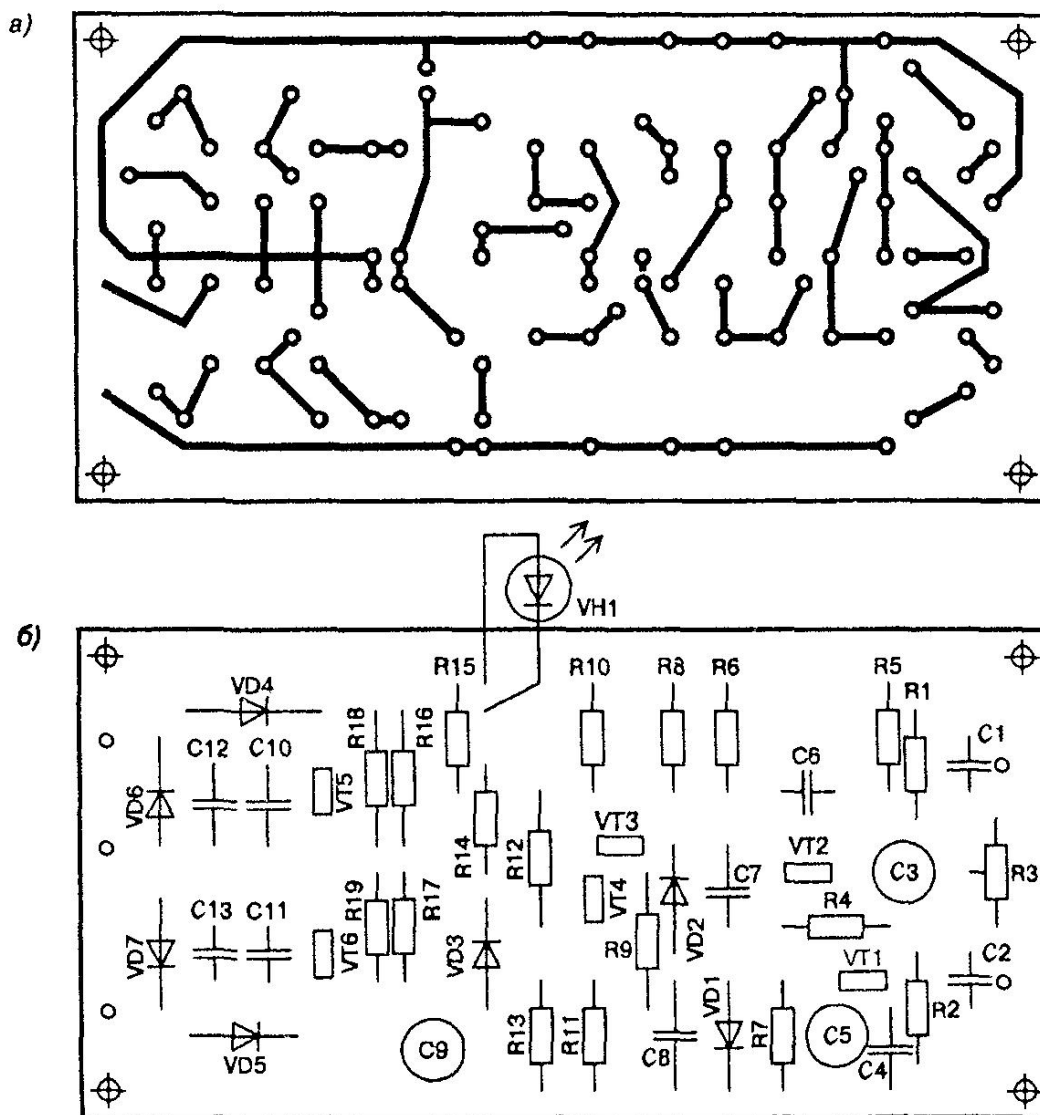


Рис. 2.23. Печатная плата (а) и сборочный чертеж (б) шумоподавителя

### Параметрическое динамическое подмагничивание

При обычном способе записи аналоговых сигналов возникают искажения формы сигналов, связанные с нелинейностью характеристики носителя, а также с несовершенством системы записи. Нагрузочная способность лент полностью не реализуется. Кроме того,

имеет место недоиспользования тракта записи по параметру «сигнал/шум» около 7,5 дБ.

Совершенно по-другому обстоит дело при ШИМ-записи [14, 22], обладающей параметрическим динамическим подмагничиванием. Нагрузочная способность увеличивается в 2 раза при одновременном увеличении отношения сигнал/шум.

Идея использования широтно-импульсной модуляции для высокоэффективного усиления колебаний звуковой частоты предложена Д. Агеевым [23] более 50 лет назад. Эти усилители относят к классу D. КПД таких усилителей достигает 0,9 (теоретическое значение близко к 1), в то время как КПД усилителей класса АВ едва достигает 0,7, а класса А и того меньше — 0,5.

*Примечание редактора.* Усилительный каскад класса А может иметь максимальный КПД равный 0,5 только при условии работы с трансформаторным выходом, когда амплитуда выходного напряжения (на обмотке трансформатора) достигает величины напряжения питания. У каскада с резистивной нагрузкой, где максимальная амплитуда выходного напряжения ограничена величиной, равной половине напряжения питания, максимальный КПД составляет 0,25.

При относительно низкой частоте дискретизации амплитудная характеристика тракта имеет ярко выраженный нелинейный характер, следствием чего является большой уровень нелинейных и комбинационных искажений. К примеру, коэффициент третьей гармоники при  $f_d/f_c = 7$  составляет 1,85%, при 10 — 0,9%, а при 15 — 0,4% [24].

До недавнего времени этот способ усиления не находил широкого применения из-за относительной сложности и отсутствия необходимой элементной базы.

Различают биполярную ШИМ (модуляция по трем уровням:  $+E_{п}$ , 0 и  $-E_{п}$ ) и однополярную ШИМ (модуляция по двум уровням:  $+E_{п}$  и  $-E_{п}$ ).

Наиболее проста реализация однополярной ШИМ. Амплитуда выходного напряжения (тока) пропорциональна коэффициенту модуляции  $K_{мод}$ :

$$K_{мод} = \frac{U_{мс}}{U_{мп}}, \quad (2.9)$$

где  $U_{мс}$  — амплитудное значение сигнала;

$U_{мп}$  — амплитудное значение пилообразного напряжения.

Максимальный  $K_{мод}$  обычно не превышает 0,8...0,9.

Процессы коммутации вызывают появление боковых полос с частотами  $n \cdot f_d \pm m \cdot f_c$  где  $n$  и  $m$  — целые числа (1, 2, 3 и т.д.). Поэтому для получения  $K_r < 0,01\%$  частота дискретизации должна быть около 200 кГц, что и имеет место в современных способах цифровой записи звука.

При передаче сигналов малого уровня амплитуда сигналов ШИМ имеет полное напряжение питания при очень малой их длительности. Конечное время процесса коммутации вносит дополнительные трудности при обеспечении широкого динамического диапазона. Поэтому в качестве компараторов необходимо применять быстродействующие ОУ. Очень важно, чтобы они имели одинаковое время восстановления после, как плюсовой, так и минусовой перегрузки. Разное время восстановления является причиной дополнительных искажений. Немаловажную роль играет форма пилообразного напряжения для ШИМ:

- ♦ нарастающая пила;
- ♦ спадающая пила;
- ♦ треугольная симметричная пила.

В первых двух случаях имеет место односторонняя ШИМ, когда смещается только передний или задний фронт, в последнем — двусторонняя, когда смещаются оба фронта импульсов относительно вершин пилообразного напряжения.

Во избежание искажений ШИМ, вызванных перезарядом входных емкостей компаратора, в качестве модулирующего предпочтительнее следует отдавать симметричному пилообразному напряжению. В этом случае отсутствует различие в мгновенном перепаде напряжений на входах компаратора для положительной и отрицательной полуволн записываемого сигнала (рис. 2.24).

Возможный вариант реализации симметричного ГПН со стабилизацией тока заряда-разряда на токовом насосе Хауланда показан на рис. 2.25.

На вход генератора подают двуполярный сигнал типа «меандр». Отношение резисторов  $R3/R1 = R4/R2$  определяет отношение выходных напряжений  $U_2/U_1$ . Для лучшей привязки выходного напряжения  $U_2$  к «общему» необходимо, чтобы отрицательная обратная связь немного преобладала, т.е. должно выполняться условие  $R3/R1 > R4/R2$ . Постоянная времени  $R1, C$  определяет амплитуду выходного напряжения  $U_1$  на частоте



Рис. 2.24. Перепад напряжений на входе компаратора

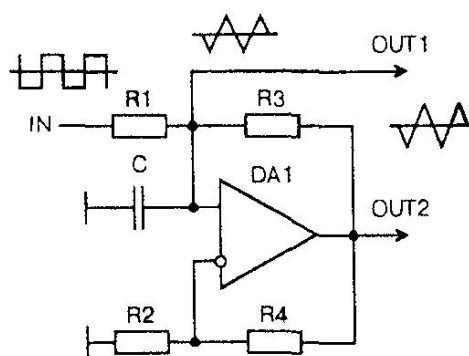


Рис. 2.25. Формирователь симметричного пилообразного напряжения на токовом насосе Хауланда

те входного сигнала. Для стабильности амплитуды при изменении температурных условий ТКЕ конденсатора должен быть МПО или М47.

Высокая линейность пилообразного напряжения очень важна для исключения дополнительных искажений.

Для улучшения линейности характеристики передачи импульсных усилителей используют обратную связь — как в обычных усилителях, работающих с непрерывными сигналами. Глубина обратной связи зависит от качества фильтрации сигналов и отношения  $f_D/f_B$ , где  $f_B$  — верхняя рабочая частота. Очевидно, что чем выше это отношение, тем меньше фазовый сдвиг выходного сигнала, а значит, и глубже может быть обратная связь.

Введение ООС [14] не только линеаризирует саму систему ШИМ (устраняет статическую ошибку компаратора, линеаризирует записываемый ток ГЗ), но и уменьшает искажения формы тока записи, вносимые самой головкой, достигающие 0,2...0,4%. Кроме того, параллельная ООС снижает входное сопротивление модулятора, делая его нечувствительным к наводкам ГСП, ГПН и ШИМ. Второй вход компаратора, выполняющего роль модулятора, защищен от наводок шунтирующим действием низкоомного выхода ГПН и не должен содержать высокоомных резисторов в цепи сигнала ГПН.

Для демодуляции ШИМ-сигнала его достаточно проинтегрировать. Подобно тому, как в усилителях класса D полезный сигнал выделяется индуктивностями катушек динамических головок, при ШИМ-записи интегрирование сигнала происходит в ГЗ. Причем, в отличие от усилителя класса D, где гармоники носят паразитный характер, гармоники ШИМ-сигнала при записи выступают в роли тока подмагничивания.

Характерная особенность этого способа записи заключается в том, что сумма тока записи и тока подмагничивания постоянна, т.е.  $I_3 + I_D = \text{const}$ . Это вытекает из того, что амплитудное значение импульсов ШИМ постоянно (зависит от напряжения питания), а раз напряжение постоянно, то постоянен и суммарный ток, происходит лишь его перераспределение (между током записи и током подмагничивания) в зависимости от коэффициента модуляции.

Остановимся более подробно на процессах, происходящих в головке записи. Мгновенные значения ЭДС  $e_L$  связаны с мгновенными значениями магнитного потока  $\Phi$  соотношением:

$$e_L = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.10)$$

Так как

$$\Phi = i \cdot L, \quad (2.11)$$

$$e_L = - \frac{d(iL)}{dt} \quad (2.12)$$

Поскольку магнитная головка используется в режиме, при котором относительная магнитная проницаемость  $\mu_R$  остается постоянной, индуктивность головки  $L$  также постоянна, следовательно, множитель  $L$  можно вынести за знак производной, т.е.:

$$e_L = -\frac{Ldi}{dt}. \quad (2.13)$$

По второму закону Кирхгофа напряжение на зажимах цепи в каждый момент времени равно по значению и противоположно по знаку ЭДС, имеющейся в цепи, следовательно  $u_L = -e_L$ , откуда:

$$u_L = \frac{Ldi}{dt}. \quad (2.14)$$

Полученное выражение связывает мгновенные значения тока в цепи с мгновенными значениями напряжения на выводах головки. Из выражения (2.14) следует, что напряжение на головке пропорционально не току, а скорости изменения тока. В случае, когда ток не изменяется, напряжение равно нулю.

Длительность импульса  $t_H$  равна:

$$t_H = 0,5 \cdot T = \frac{0,5}{f_H}, \quad (2.15)$$

где  $f_H$  — частота подмагничивания.

При  $f_H = 80$  кГц:

$$t_H = \frac{0,5}{80 \cdot 10^3} = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 6,25 \text{ мкс}.$$

При этом, благодаря интегрирующему действию головки, ток через головку достаточно линеен, т.к. находится на начальном участке ее характеристики, поскольку постоянная времени цепи головки  $\tau_L$  равна:

$$\tau_L = \frac{L}{R} = \frac{0,12}{2700} = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 44 \text{ мкс},$$

где  $L = 0,12$  Гн — индуктивность универсальной головки (типичное значение);

$R = 2700$  Ом — сопротивление, включенное последовательно с головкой (например, 2R12 на рис. 2.27).

Учитывая, что длительность импульса  $t_H$  значительно меньше постоянной времени  $\tau_L$ , выражение (2.14) можно преобразовать к виду:

$$I_M = \frac{U_H \cdot t_H}{L} = \frac{U_H}{2 \cdot L \cdot f_H}, \quad (2.16)$$

где  $I_M$  — амплитудное значение тока подмагничивания;

$U_H$  — напряжение питания.

Тогда действующее значение тока подмагничивания равно:

$$I_H = \frac{I_M}{\sqrt{2}} = \frac{U_H \cdot t_H}{\sqrt{2} \cdot L} = \frac{U_H}{4 \cdot L \cdot f_H}. \quad (2.17)$$

Ток подмагничивания при  $U_{\text{п}} = 15$  В и частоте подмагничивания 80 кГц для головки индуктивностью 120 мГн равен:

$$I_{\text{п}} = \frac{U_{\text{п}} \cdot t_{\text{н}}}{2L} = \frac{15 \cdot 6,25 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,12} = 0,39 \text{ мА.}$$

Таким образом, изменяя напряжение питания или частоту ГСП (или то и другое одновременно), можно в широких пределах регулировать ток подмагничивания. Учитывая, что в стереофоническом варианте поканальная регулировка частоты дискретизации отпадает, остается единственный вариант регулировки — изменением напряжения питания.

ШИМ-напряжение, определяющее уровень записи, пропорционально коэффициенту модуляции  $K_{\text{мод}}$ :

$$U_3 = 0,7 \cdot U_{\text{п}} \cdot K_{\text{мод}} \quad (2.18)$$

Откуда:

$$I_3 \approx \frac{U_3}{\Sigma R} = \frac{0,7 \cdot U_{\text{п}} \cdot K_{\text{мод}}}{\Sigma R}, \quad (2.19)$$

где  $\Sigma R$  — суммарное сопротивление резисторов в цепи головки записи, в том числе и омическое сопротивление самой головки.

Так, например, для обеспечения тока записи  $I_3 = 0,1$  мА при напряжении питания усилителя записи  $\pm 15$  В и суммарном сопротивлении в цепи головки  $\Sigma R = 12$  кОм коэффициент модуляции  $K_{\text{мод}}$  будет равен:

$$K_{\text{мод}} = \frac{I_3 \cdot \Sigma R}{0,7 \cdot U_{\text{п}}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^3}{0,7 \cdot 15} = 0,11.$$

На осциллограмме выходного напряжения (рис. 2.26) это будет выглядеть в виде девиации, равной 0,22 периода, т.е. чуть меньше четверти периода.

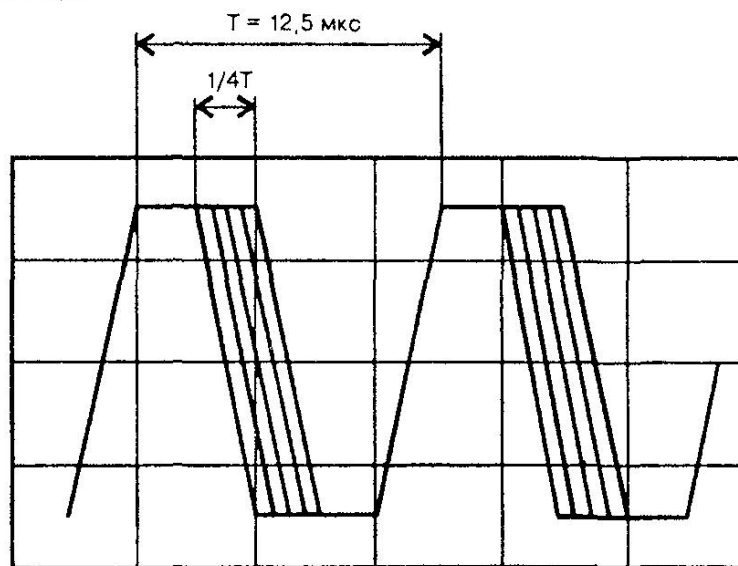


Рис. 2.26. Осциллограмма выходного напряжения узла записи

На основании рассмотренных формул можно сделать следующие выводы:

1. При постоянной частоте дискретизации  $f_d$  и коэффициенте модуляции  $K_{\text{мод}}$  с возрастанием напряжения питания  $\pm U_{\text{п}}$  пропорционально возрастают ток подмагничивания и ток записи.
2. При постоянном напряжении питания ток подмагничивания возрастает с уменьшением частоты дискретизации и наоборот.
3. Уровень записи зависит от напряжения питания, коэффициента модуляции и суммарного сопротивления в цепи головки и не зависит от частоты дискретизации.

Упрощенный вариант (для записи на наиболее распространенную ленту МЭК-1) реализации указанного способа записи показан на рис. 2.27. Записи, сделанные на ленте МЭК-1, по высоким частотам и отношению С/Ш не уступают записям на ленте МЭК-2, а по проработке низких частот — превосходят.

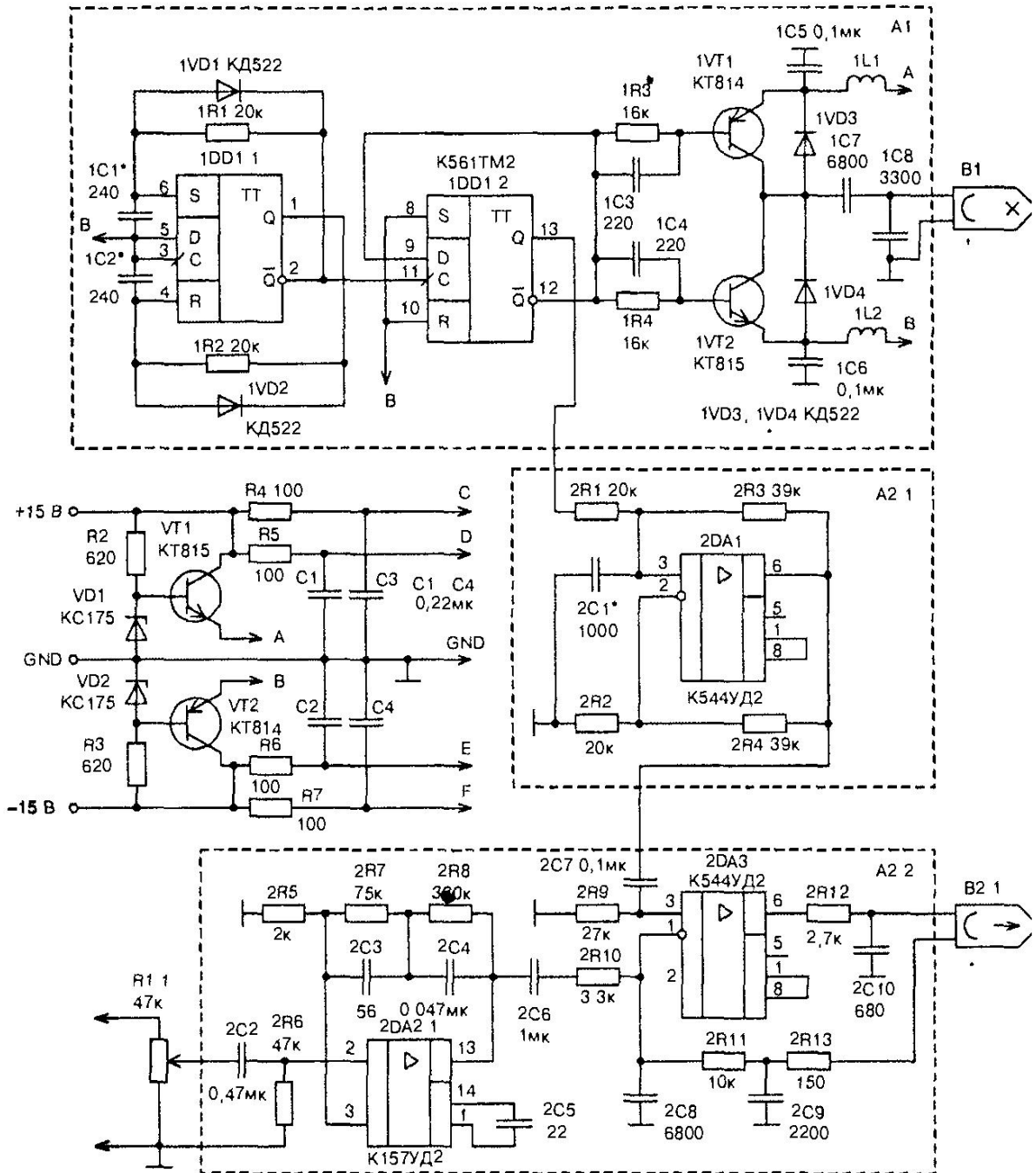
Задающий генератор выполнен на триггере 1DD1.1. Подбором конденсаторов 1C1, 1C2 устанавливают частоту генератора около 160 кГц, что после деления вторым триггером 1DD1.2 составит 80 кГц. На транзисторах 1VT1, 1VT2 выполнен генератор стирания. С помощью конденсаторов 1C7, 1C8, образующих последовательно-параллельный контур со стирающей головкой, добиваются максимального напряжения ГС с минимальными искажениями формы сигнала. В качестве дросселей можно использовать дроссели типа ДМ-0,2.

На 2DA1 выполнен формирователь пилообразного напряжения. Подбором конденсатора 2C1 выставляют амплитуду пилообразного напряжения (от пика до пика) около 12 В ( $U_{\text{э}} \approx 3$  В). Предварительный усилитель выполнен на сдвоенном ОУ типа К157УД2. На схеме показан только один канал. Выходной каскад, он же компаратор, он же формирователь АЧХ записи, выполнен на ОУ типа К544УД2.

Подбором частоты генератора добиваются оптимального тока подмагничивания по максимальной отдаче на средних частотах (0,3...1 кГц) при коэффициенте третьей гармоники не более 1%, а с помощью входного регулятора устанавливают оптимальный уровень записи, который определяет вполне определенный коэффициент модуляции. При необходимости, подбором резистора 2R11 регулируют АЧХ записи в области средних частот. Резистор 2R13 определяет добротность последовательного контура, образованного индуктивностью головки и конденсатором 2C9, от которой зависит равномерность АЧХ в области ВЧ. Для наглядной установки оптимального уровня записи усилитель должен быть дополнен индикатором.

### **Встречное подмагничивание**

Аналогичный эффект постоянства суммы тока записи и тока подмагничивания можно получить, если применить встречное подмагничива-



Вывод 7 DD1 подключить к цепи В (-7 В)  
 Вывод 14 DD1 подключить к цепи А (+7 В)  
 Вывод 7 2DA1 и вывод 11 2DA2 подключить к цепи С (+15 В)  
 Вывод 4 2DA1 и 2DA2 подключить к цепи F (-15 В)  
 Вывод 7 2DA3 подключить к цепи D (+15 В)  
 Вывод 4 DA3 подключить к цепи E (-15 В)

**Рис. 2.27.** Усилитель записи с параметрическим динамическим подмагничиванием

ние: с одной стороны — напряжение звуковой частоты, а с другой — напряжение подмагничивания треугольной формы (рис. 2.28).

Как видно из рисунка, сумма тока записи и тока подмагничивания — величина примерно постоянная, равная сумме площадей заштрихованных треугольников. Возможный вариант реализации этого способа показан на рис. 2.29. Формирователь пилообразного напря-

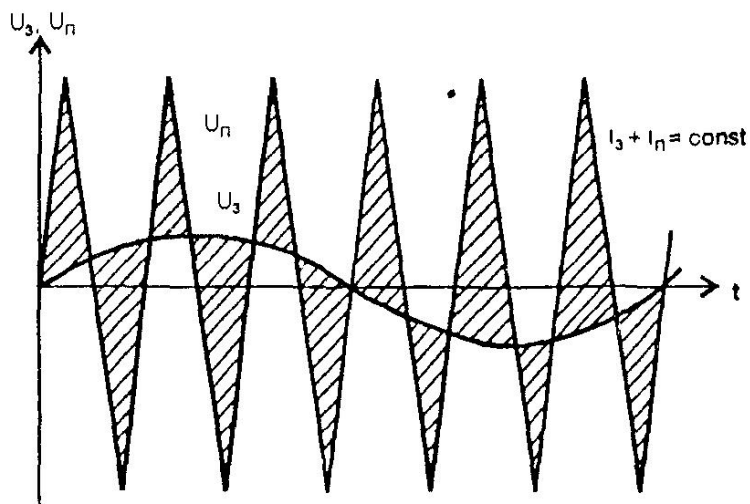


Рис. 2.28. Форма тока записи при встречном подмагничивании

жения представляет собой модифицированный «токовый насос» Хауленда. Амплитуду выходного напряжения, а соответственно, и ток подмагничивания для ленты МЭК-1 регулируют подбором конденсатора 2С1 в нижнем положении переключателя 2S1.

Переход с ленты МЭК-1 на ленту МЭК-2 осуществляется изменением

глубины ОС с помощью переключателя 2S1, т.е. переключением его в верхнее по схеме положение. Регулировку тока подмагничивания осуществляют подбором резисторов 2R12, 2R14. Важно, чтобы отношения резисторов в обеих цепях ОС были одинаковы.

В качестве усилителя записи можно использовать любой усилитель со стандартной АЧХ (табл. 2.8). Сигнал с усилителя подают через параллельно включенные конденсатор емкостью 1200...2200 пФ (обеспечивающий с индуктивностью магнитной головки последовательный колебательный контур, настроенный на верхнюю рабочую частоту) и подстроечный резистор сопротивлением 10 кОм, выставленный примерно на 3 кОм. Добротность последовательного колебательного контура, отвечающую за ход АЧХ записи в области ВЧ, регулируют сопротивлением 100...200 Ом, включенным последовательно с конденсатором. После подбора оптимального тока подмагничивания по минимуму искажений на средних и низких частотах подают сигнал от генератора «пачек» и, производя записи с разным положением подстроечного резистора, добиваются равномерной АЧХ записи-воспроизведения. АЧХ воспроизведения должна быть предварительно проверена с помощью специальных лент: ЗЛИЛ2.Ч.4-120 или ЗЛИТ1.Ч.4.

### Система Super Auto BLE

Super Auto BLE (от первых букв следующих слов: Bias — ток подмагничивания; Level — уровень записи; Equalization — глубина ВЧ-коррекции) — компьютерная система оптимизации параметров тракта записи японской фирмы Pioneer.

Процесс оптимизации заключается в выполнении пробной записи тестовых синусоидальных сигналов разных частот от встроенного генератора. Во время записи происходит пошаговое изменение вышеупомянутых параметров тракта записи. Затем сделанная запись анализируется специальным процессором, и по результатам анализа

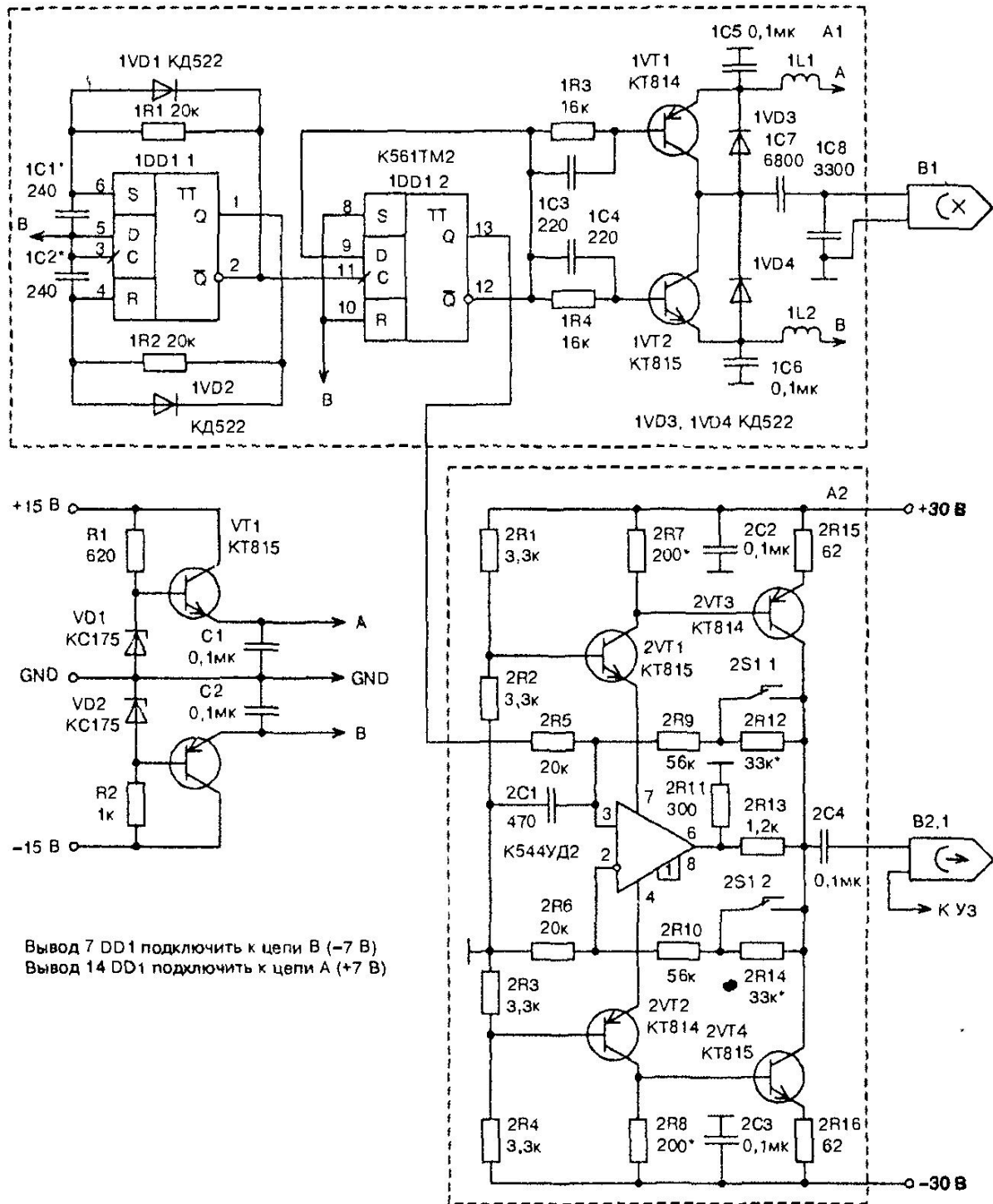


Рис. 2.29. Усилитель записи со встречным подмагничиванием

выбираются оптимальные значения параметров, при которых и осуществляется запись на данную ленту.

Более простая система, без компьютерной обработки, запатентована в Японии еще в 1979 году [25].

Даже самые дешевые деки фирмы Pioneer, оснащенные упрощенной версией этой системы (Auto BLE), заметно выделяются качеством записи среди конкурентов.