

АНАЛОГОВАЯ МАГНИТНАЯ ЗАПИСЬ АУДИО- И ВИДЕОСИГНАЛОВ

1.1. Физические основы магнитной записи звуковых сигналов

Магнитная запись основана на свойствах ферромагнитных материалов намагничиваться под действием внешнего магнитного поля и оставаться намагниченными после выхода из этого поля. Такое поле возникает при протекании тока звуковой частоты по обмотке катушки с сердечником из магнитомягкого материала, который имеет зазор. В системах звукозаписи обычно используются замкнутые кольцевые сердечники, в которых вблизи зазора возникает внешнее поле рассеивания, намагничивающее носитель записи (НЗ), движущийся в этом поле. При этом изменения тока катушки превращаются в изменения остаточной намагниченности вдоль носителя.

Остаточное магнитное поле, возникающее в результате записи звуковых сигналов (ЗС), имеет целый ряд магнитных материалов, которые используются для изготовления рабочего слоя (РС) магнитных лент. Внутреннее и внешнее магнитные поля катушки с сердечником могут создаваться суммарным током ЗС и высокочастотного (ВЧ) подмагничивания или током стирания¹.

Магнитный поток, Φ_c , определяется по следующей формуле:

$$\Phi_c = \frac{IN_B}{R_{м.с}},$$

где I — ток в катушке, А; N_B — число витков катушки; $R_{м.с}$ — полное магнитное сопротивление цепи сердечника, А/Вб;

$$R_{м.с} = \sum_j R_{jc},$$

где R_{jc} — магнитное сопротивление j -го участка магнитопровода.

Магнитопроводы магнитных головок по своей длине могут иметь различную площадь сечения S_{jc} , включать в себя материалы с различной относительной магнитной проницаемостью

¹ Основные характеристики внутреннего поля сердечника, возникающего под действием переменного или постоянного тока в катушке, далее обозначены нижним индексом «с».

μ_c и разные по величине зазоры, где $\mu_c = 1$. В связи с этим R_{jc} рассчитывают по формуле

$$R_{jc} = \frac{l_{jc}}{\mu_0 \mu_{jc} S_{jc}},$$

где l_{jc} — длина j -го отрезка пути магнитопровода, характеризующаяся значениями S_{jc} и μ_{jc} ; μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м).

Магнитная индукция, Т, на j -м участке магнитопровода

$$B_{jc} = \frac{\Phi_c}{S_{jc}}. \quad (1.1)$$

Напряженность магнитного поля, А/м, на j -м участке магнитопровода

$$H_{jc} = \frac{B_{jc}}{\mu_0 \mu_{jc}}. \quad (1.2)$$

Абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м, является коэффициентом пропорциональности между B и H на любом участке магнитопровода:

$$\mu_{a.c} = \frac{B_{jc}}{H_{jc}}.$$

У магнитных материалов, используемых для сердечников катушки, три наиболее важных параметра: относительная начальная магнитная проницаемость $\mu_{н.c}$, индукция насыщения B_{sc} и коэрцитивная сила H_{xc} . Они определяют форму петли гистерезиса сердечника. Чем больше B_{sc} , тем большее значение тока допускается в катушке. Коэрцитивная сила определяет минимальное значение тока, при котором он начинает перемагничивать сердечник.

Для изготовления сердечников применяют магнитные материалы, обладающие высокой начальной магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой. Такие материалы имеют узкую

Таблица 1.1

Материалы для магнитных головок

Материал	Начальная магнитная проницаемость, Гн/м	Индукция насыщения, Т	Коэрцитивная сила, А/м
Пермаллой	20 000 ... 100 000	0,6 ... 1,6	0,3 ... 16,0
Феррит	2 000 ... 5 000	0,3 ... 0,5	1,5 ... 2,0
Сендаст	25 000 ... 50 000	0,6 ... 1,3	0,1 ... 0,2

петлю гистерезиса и, следовательно, малые потери на гистерезис. В табл. 1.1 приведены эти данные для некоторых материалов, используемых с целью изготовления сердечников. Недостатком пермаллоя (сплав NiFe) является значительное изменение магнитных свойств при механической обработке и большие потери на гистерезис на частотах более 20 кГц. Сендаст (сплав AlFeSi) имеет малые потери на гистерезис, обладает высокой износостойкостью, но довольно дорог.

Таким образом, напряженность магнитного поля в глубине зазора сердечника H_0 можно рассчитать по формуле

$$H_0 = \frac{IN_n}{\mu_0 R_{м.с} S_0},$$

где S_0 — площадь сечения зазора.

Заменяя в этой формуле общее значение тока I током ЗС $I_{ЗС}$, током ВЧ-подмагничивания $I_{подм}$ или током стирания $I_{ст}$, по этой же формуле можно рассчитать напряженность соответствующего поля в зазоре головки.

Магнитное поле, возникающее под действием тока в катушке, сосредоточено в основном внутри сердечника, и только в местах расположения воздушных зазоров оно выходит наружу в виде внешнего поля рассеяния. Это поле имеет векторный характер, однако запись ЗС, подмагничивание и стирание фонограммы осуществляются в основном горизонтальной составляющей напряженности поля H_x , действующей в направлении движения НЗ.

1.2. Магнитные ленты для записи звуковых сигналов

Основными характеристиками рабочего слоя магнитной ленты являются кривая начальной намагниченности и предельная петля гистерезиса (рис. 1.1)¹.

Пока максимальное значение напряженности магнитного поля ленты не превышает напряженности насыщения H_s , ее перемагничивание осуществляется по частным петлям гистерезиса, показанным на рис. 1.1 пунктиром. При больших значениях напряженности магнитного поля перемагничивание происходит по предельной петле гистерезиса I . Эта петля гистерезиса НЗ имеет четыре основные характеристики: коэрцитивная сила H_k , напряженность насыщения H_s , намагниченность насыщения M_s и максимальная остаточная намагниченность M_r .

¹ Параметры магнитного поля сердечника и НЗ во многом совпадают, поэтому в их обозначениях не будет нижнего индекса «с».

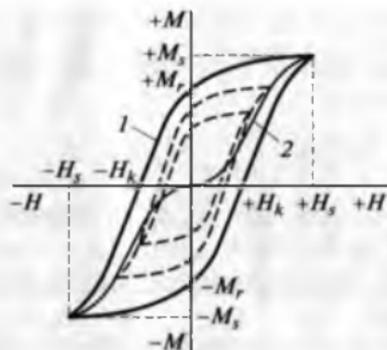


Рис. 1.1. Петли гистерезиса:

1 — предельная петля гистерезиса; 2 — начальная кривая намагничивания

Под действием напряженности магнитного поля катушки H_x носитель записи получает намагниченность:

$$M = \rho H_x,$$

где ρ — магнитная восприимчивость ленты, $\rho = \mu - 1$; μ — магнитная проницаемость материала РС.

В приведенном на рис. 1.1 семействе петель гистерезиса $M = \varphi(H_x)$ кривая 2, проходящая через начало координат, называется *начальной кривой намагничивания*. Магнитная проницаемость РС μ максимальна лишь на коротком линейном участке этой кривой. Она сильно уменьшается при малых и больших значениях напряженности H_x . За цикл перемагничивания μ меняется от $\mu_{\text{нач}}$ до $\mu_{\text{мах}}$ в соответствии с формой кривой начального намагничивания. Коэффициент прямоугольности петли гистерезиса определяется отношением

$$K_n = \frac{M_r}{M_s}.$$

Иногда на графике предельной петли гистерезиса по оси ординат откладывается величина магнитного потока Φ или магнитная индукция B . Поэтому запись на магнитной ленте может также характеризоваться остаточными максимальными значениями магнитного потока Φ_r или магнитной индукции B_r . Они приводятся в справочниках и связаны между собой следующими равенствами:

$$B_r = \mu_0 M_r, \Phi_r = \mu_0 M_r S_d,$$

где S_d — площадь поперечного сечения РС магнитной ленты, через которую проходит магнитный поток поля катушки.

При записи звуковых сигналов в РС ленты создается остаточный магнитный поток, который может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\Phi_r = \mu_0 \left(\frac{M_r}{M_s} \right) M_g b_m d_m K_v,$$

где M_g — намагниченность частиц; b_m — ширина дорожки записи; d_m — толщина РС магнитной ленты; K_v — коэффициент объемного заполнения, показывающий, какую часть РС составляет магнитное вещество.

Из приведенной формулы видно, что увеличить остаточный магнитный поток можно повышением коэффициента прямоугольности, намагниченности частиц и коэффициента объемного заполнения.

Магнитная лента состоит из немагнитной подложки и магнитного лака с ферромагнитным порошком, образующих РС. Подложка для большинства лент изготавливается из лавсана (полиэтилентерефталат) толщиной от 4 до 100 мкм. Для изготовления покрытия ленты используются магнитные порошки (табл. 1.2). Ленты, имеющие РС на основе двуокиси хрома и чистого железа, обладают лучшими характеристиками, чем ленты со слоем на основе γ -оксида железа и феррита кобальта.

В последнее время стали изготавливать двухслойные РС. Верхний слой — CrO_2 , нижний — γ -диоксид железа. Это обеспечивает подъем амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фонограммы в области высоких частот. Наиболее совершенные ленты имеют еще очень тонкий, но весьма прочный верхний защитный слой. Толщина студийных лент бывает от 10 до 60 мкм, чаще всего она равна 55 мкм. Ленты для бытовых магнитофонов значительно тоньше — от 35 до 12 мкм. Ширина лент для моно- и стереофонической записи равна 6,25 мм. Для многоканальной записи применяют более широкую ленту: 8; 12,7; 25,4 и 50,8 мм.

Рассмотрим характеристики рабочего слоя магнитных лент. *Чувствительность* характеризует отношение величины остаточного магнитного потока Φ_r , получаемого при записи, к низкочастотному (НЧ) полю головки H_{\pm} , создаваемому током записи.

Максимальная крутизна остаточного потока при квази-идеальном намагничивании Ψ_{\max} позволяет рассчитать остаточный поток РС ленты при записи с оптимальным ВЧ подмагничиванием:

$$\Phi_r = \Psi_{\max} H_{\pm}.$$

Эта крутизна тем выше, чем больше коэффициент прямоугольности ленты.

Характеристики материалов для магнитных лент

Порошок	Формула порошка	Размер частиц, мкм	Коэрцитивная сила, кА/м	Индукция насыщения, Т	Коэффициент прямоугольности	Намагниченность частиц, кА/м
Гамма-оксид железа	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0,2...0,5	24	0,5	0,5	400
Кобальтированный гамма-оксид железа	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \text{Co}$		28...80	0,6		
Диоксид хрома	CrO_2	0,1...0,4	36...56	0,6	0,9	490
Феррит бария	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	0,08	119	0,5	—	—
Железо	Fe	0,1...0,2	80	1	0,9	1400
Сплавы с железом	Fe + металл		119	1	—	2000

Максимальный уровень записи часто называют *удельным магнитным потоком* и определяют, нВб/м, как

$$\Phi_{\text{уд}} = \frac{\Phi_{r\text{max}}}{b_m}$$

Чем выше уровень записи, тем меньше относительный шум паузы, но больше нелинейные искажения.

В России для студийной и репортерской стереофонической записи за максимальный уровень записи принято значение 510 нВб/м на частоте 1 кГц. Для всех бытовых магнитофонов этот уровень равен 256 нВб/м на частоте 400 Гц. При этих уровнях записи нелинейные искажения обычно не превышают 3%. Для обеспечения необходимого динамического диапазона записи фонограммы ток записи ЗС должен быть на 20 дБ ниже тока, соответствующего максимальному уровню записи. У некоторых зарубежных магнитных лент допустимый уровень записи превышает 1000 нВб/м.

Номинальная АЧХ остаточной намагниченности ленты $N(M_r)$ (уровень записи) стандартизуется в целях обмена фоно-

граммами. Важно, чтобы фонограмма, записанная на каком-либо магнитофоне, могла быть воспроизведена без искажений на другом магнитофоне того же класса. Без искажений должны воспроизводиться и фонограммы промышленного производства. В международной практике принято нормировать АЧХ канала записи. При этом считается, что цепи коррекции тракта записи обеспечивают равномерную по частоте намагниченность ленты.

Стандарт определяет АЧХ остаточной намагниченности $N(M_r)$ с помощью двух постоянных времени τ_1 и τ_2 . Величина τ_1 определяет спад остаточной намагниченности РС ленты в области высоких частот, а τ_2 — подъем в области низких частот.

Амплитудно-частотная характеристика остаточной намагниченности, дБ, рассчитывается по формуле

$$N(M_r) = 10 \lg \left(1 + \frac{1}{\Omega^2 \tau_2^2} \right) - 10 \lg (1 + \Omega^2 \tau_1^2),$$

где Ω — круговая частота;

$$\Omega = 2\pi F.$$

Здесь F — текущая частота звукового сигнала.

Значения постоянных времени τ_1 и τ_2 зависят от скорости записи и типа ленты. Данные по цепям коррекции отечественного стандарта приведены в табл. 1.3.

По стандарту $\tau_1 = 3\ 180$ нс, и эта постоянная времени определяет подъем остаточной намагниченности в области нижних частот от 50 Гц с крутизной 6 дБ/окт. Подъем на нижней частотной границе составляет примерно 5 дБ. Такой подъем АЧХ остаточной намагниченности ленты обеспечивает повышение SNR (*Signal to*

Таблица 1.3

Частотная коррекция стандартной АЧХ

Вид измерительных лент	Скорость ленты, см/с	Постоянная времени, мкс	
		τ_1	τ_2
Для студийных и репортерских магнитофонов	38,1	35	Нет коррекции
	19,05	70	То же
	9,53	90	3 180
Для бытовых магнитофонов	19,05	70	Нет коррекции
	9,53	90	3 180
	4,76	120	1 590

Noise Ratio — отношение сигнал-шум) в области низких частот. На рис. 1.2 приведены стандартизованные АЧХ уровня записи.

Частотные искажения существенно зависят от параметров РС ленты. Они тем меньше, чем больше его коэрцитивная сила. При увеличении остаточной индукции из-за саморазмагничивания частотные искажения возрастают. Если петля гистерезиса приближается к прямоугольной форме, то частотные искажения фонограммы при всех прочих равных условиях уменьшаются.

Чем *толще рабочий слой ленты*, тем выше ее чувствительность, меньше нелинейные искажения и шум, но хуже АЧХ и больше проявляется копирэффekt (КЭ). Диапазон изменения толщины РС — от 1 до 20 мкм.

Шум магнитной ленты прежде всего обусловлен неоднородностью частиц магнитного порошка и неравномерностью распределения их в РС магнитной ленты, поэтому его называют структурным. Чем меньше размеры частиц и выше их однородность, тем меньше уровень шума. Структурный шум имеет нормальное распределение и НЧ энергетический спектр. Уровень структурного шума зависит от ширины дорожки, и из-за некогерентности этого шума при каждом ее уменьшении вдвое отношение сигнал-шум уменьшается на 3 дБ.

Различают шумы намагниченной ленты (постоянным или переменным полем), размагниченной ленты и шум паузы. Уровень шума размагниченной студийной ленты равен $-65 \dots -55$ дБ. При ВЧ-подмагничивании уровень шума возрастает на $3 \dots 10$ дБ и называется *шумом паузы*. Уровень шума ленты, намагниченной постоянным полем до насыщения, составляет $-30 \dots -26$ дБ.

При записи сигнала из-за паразитной амплитудной и частотной модуляции возникает *модуляционный шум*. Спектр этого

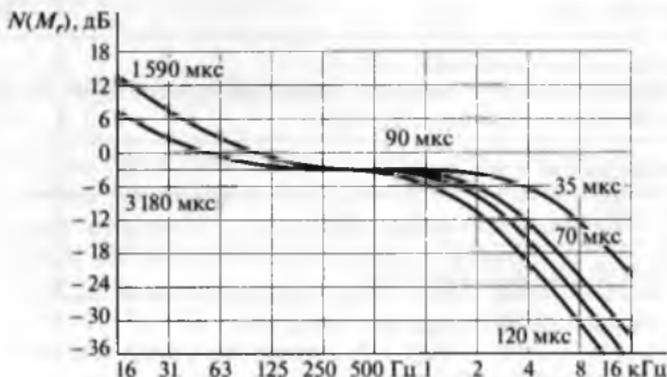


Рис. 1.2. Графики стандартизованных АЧХ уровня записи по остаточной намагниченности

шума содержит боковые полосы, расположенные симметрично относительно частоты записываемого сигнала. Нередко модуляционный шум частично маскируется записываемым сигналом. Этот шум пропорционален намагниченности ленты, поэтому его уровень не зависит от уровня записи.

Эффект саморазмагничивания фонограммы заключается в возникновении поля внутри РС магнитной ленты после записи, которое направлено навстречу полю фонограммы. Это поле вызывает уменьшение остаточной намагниченности и отдачи ленты. Напряженность поля саморазмагничивания определяется следующими равенствами:

$$H_{\text{ср}} = K_{\text{ср}} M_r, K_{\text{ср}} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{\text{зап}}}{2d_m}}$$

где $K_{\text{ср}}$ — коэффициент поля размагничивания; $\lambda_{\text{зап}}$ — длина волны записи.

Коэффициент размагничивания зависит от длины волны записи и толщины РС. Это значит, что саморазмагничивание увеличивается с уменьшением длины волны записи и увеличением толщины РС. При этом коэффициент размагничивания стремится к единице.

Магнитные свойства лент характеризуются коэрцитивной силой, остаточным магнитным потоком насыщения, намагниченностью насыщения и относительной начальной магнитной

Таблица 1.4

Характеристики студийных магнитных лент

Параметр магнитной ленты	Значение
Толщина РС, мкм	10... 19
Остаточная намагниченность, кА/м	64... 77
Намагниченность насыщения, кА/м	90... 120
Коэрцитивная сила, кА/м	17... 21
Остаточный магнитный поток, нВб	2... 11
Коэффициент прямоугольности	0,56... 76,0
Начальная магнитная проницаемость, Гн/м	1,7... 2,2
Максимальная магнитная проницаемость, Гн/м	2,8... 3,5
Максимальная крутизна магнитного потока, нВб/кА/м	0,54... 3,6

Характеристики бытовых магнитных лент в кассете

Параметр магнитной ленты	Тип магнитной ленты в кассете			
	МЭК-1	МЭК-2	МЭК-3	МЭК-4
Толщина РС, мкм	4	3,2	2,5	1,5
Постоянная времени, мкс	120	90	70	35
Материал РС	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \text{Co}$	$\text{CrO}_2 + \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fe
Коэрцитивная сила, кА/м	25	40	60	80
Индукция насыщения, Т	0,5	0,6	0,6	0,5

проницаемостью. В табл. 1.4 приведены эти данные для студийных магнитных лент.

В табл. 1.5 даны некоторые характеристики магнитных лент для бытовых кассетных магнитофонов. Из-за существенного отличия свойств РС при применении разных лент в бытовых магнитофонах требуется изменять токи записи и подмагничивания, необходимо менять и частотную коррекцию. Поэтому некоторые магнитофоны рассчитаны только на определенный тип ленты, а в ряде магнитофонов производится автоматическая регулировка токов записи и подмагничивания в зависимости от типа ленты. В кассетах часто предусматриваются специальные вырезы, которые переключают режим работы магнитофона.

1.3. Функциональная схема магнитофона

К основным функциональным узлам студийного магнитофона относятся (рис. 1.3): головка записи ГЗ, головка воспроизведения ГВ, головка стирания ГС, лентопротяжной механизм ЛПМ, усилитель записи УЗ, усилитель воспроизведения УВ, два частотных корректора К, генератор высокочастотного подмагничивания ГВЧ и три двигателя Д1, Д2, Д3. В этой схеме магнитная лента своим рабочим слоем касается всех трех головок и движется относительно них с постоянной скоростью.

Сначала с помощью ГС осуществляется стирание старой фонограммы. Затем производится запись ЗС всегда с ВЧ-подмаг-