

# НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АУДИОТЕХНИКИ

**ЭДУАРД ФОЧЕНКОВ**, начальник бюро механизации и автоматизации ОАО МСТАТОР, технический консультант по применению магнитопроводов, edf01@yandex.ru

*В статье рассматриваются вопросы применения нанокристаллических магнитомягких материалов в аудиотехнике. Даются детальные технические характеристики в сравнении с электротехнической сталью и аморфными материалами на основе железа. Приводятся практические данные и зависимости, полученные опытным путем. Даются рекомендации по применению, ссылки на источники информации и методику расчета.*

В ноябре 2015 г. предприятие российского оборонно-промышленного комплекса ОАО МСТАТОР (г. Боровичи) отметило 50-летний юбилей. Более 35 лет завод развивает технологии магнитомягких аморфных и нанокристаллических материалов [1]. Область применения этих материалов весьма обширна [2]. Возможности материалов в типичных областях применения описаны в [3–5, 18]. В настоящей статье рассматривается совершенно иная область – аудио. Автор этой статьи не является экспертом в данной области и потому не берется утверждать, как именно свойства материалов отражаются на субъективном восприятии звука. В статье сделана попытка раскрыть физи-

ческие свойства и особенности материалов применительно к аудиотехнике.

Впервые нанокристаллический материал появился в Японии под маркой FINEMET в 1987 г. В настоящее время ряд нанокристаллических материалов освоен в Германии, США, Израиле, Китае, России и в других странах. Получение и объяснение физических свойств аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов дается в [1].

В настоящее время ОАО МСТАТОР выпускает пять типов нанокристаллических лент, свойства которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства нанокристаллических лент

Свойства сплавов	АМАГ-200	АМАГ-200С	АМАГ-201	АМАГ-204	АМАГ-211
Индукция насыщения $B_{10}$ , Тл	1,20	1,16	1,20	1,20	1,25
Коэрцитивная сила $H_c$ , А/м	0,8	0,8	1,5	2,0	3,2
Проницаемость $\mu$ при частоте 10 кГц, $\times 10^3$	30 ÷ 80	50 ÷ 110	20 ÷ 30	10 ÷ 15	3 ÷ 8
Температура начала кристаллизации $T_{кр}$ , °С	515	515	515	515	510
Температура Кюри $T_c$ , °С	570	560	>560	>560	>560
Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	7,3	7,3	7,3	7,4	7,6
Коэффициент прямоугольности линейной петли гистерезиса (отжиг в поперечном поле), не более	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Удельные потери $P_{уд}$ , Вт/кг на частоте $F = 10$ кГц при $B_m = 0,2$ Тл на частоте $F = 100$ кГц при $B_m = 0,2$ Тл на частоте $F = 100$ кГц при $B_m = 0,3$ Тл	0,5 ÷ 1,0 25 ÷ 35 55 ÷ 65	0,5 ÷ 1,0 25 ÷ 35 55 ÷ 65	1 ÷ 1,5 30 ÷ 40 –	1 ÷ 2 30 ÷ 50 –	1,5 ÷ 2,5 40 ÷ 55 90 ÷ 120
Магнитострикция насыщения $\lambda_s$ , $\times 10^{-6}$	2	0,5	3	4,5	8
Отечественные и зарубежные сплавы – аналоги по применению	Finemet 5БДСР ГМ412В	Vitroperm 500F Vitroperm 800 Nanoperm	Vitroperm 500F	–	Vitroperm 250F

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ СОКРАЩЕНИЯ:

ПГ – петля гистерезиса;  
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;  
ФЧХ – фазочастотная характеристика;  
 $K_{np}$  – коэффициент прямоугольности петли гистерезиса,  $K_{np} = B_p/B_m$ ;  
НЧ – низкие частоты;  
ВЧ – высокие частоты;  
PP – Push-Pull, двухтактный ламповый каскад;  
SE – Single-Ended, одноконтный ламповый каскад;  
КНИ – коэффициент нелинейных искажений;  
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;  
SRPP – Shunt regulated push-pull amplifier, распространенный двухламповый каскад;  
ООС – отрицательная обратная связь.

Свойства нанокристаллических материалов можно эффективно регулировать режимом отжига. Поскольку уровень технологии определяет итоговые качественные характеристики сердечников, характеристики изделий у разных производителей далеко не одинаковы. На МСТАТОРе, используя АМАГ-200 С, разным режимом отжига получают четыре типа петли гистерезиса: 1) прямоугольную (серия MSSN, отжиг в продольном магнитном поле,  $K_{np} > 0,98$ ); 2) округлую (отжиг без поля, по форме напоминает ПГ феррита); 3) линейную с максимальной начальной проницаемостью (серия MSFN, типовой  $K_{np} = 0,45$ , отжиг с оптимизацией по проницаемости); 4) максимально линейную (серия MSTAN, типовой  $K_{np} = 0,1...0,15$ , отжиг с оптимизацией

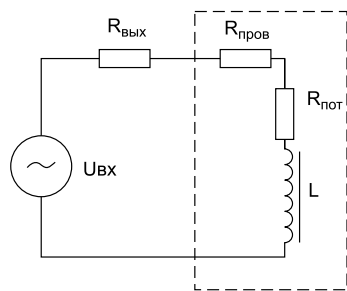


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная последовательная схема лампового каскада, нагруженного на первичную обмотку трансформатора

по линейности). Последняя серия используется для аудио-приложений.

### ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕРИИ MSTAN

1. Индукция насыщения сравнима с аморфными сплавами на основе железа и трансформаторной сталью (соответственно 1,16 в сравнении с 1,56 и 1,85).
2. Линейность кривой намагничивания. Типовой коэффициент прямоугольности 0,1...0,15. Отношение максимальной магнитной проницаемости к начальной магнитной проницаемости 1,25...1,3.
3. Высокая начальная относительная магнитная проницаемость (до 70000). Слабая зависимость магнитной проницаемости от амплитуды индукции и частоты.
4. Низкая магнитострикция ( $0,5 \cdot 10^{-6}$ ). Примерно 1/40 в сравнении с аморфными сплавами на основе железа, примерно вдвое ниже в сравнении с трансформаторной сталью. Менее подвержены механическим воздействиям, малый звуковой уровень шума.
5. Отличные высокочастотные характеристики. Очень малые потери. Примерно 1/5 в сравнении с аморфными сплавами на основе железа и примерно одинаковые потери в сравнении с аморфными сплавами на основе кобальта. Примерно 1/35 в сравнении с трансформаторной сталью (на частоте 100 Гц).
6. Отличные температурные характеристики и слабый эффект старения. Для материала AMAF-200 С характерно изменение проницаемости менее  $\pm 10\%$  в температурном диапазоне  $-50...150^\circ\text{C}$ .
7. Тороидальная форма магнитопроводов обеспечивает небольшие габариты и массу, малую индуктивность рассеяния, малое активное сопротивление обмоток и улучшает коэффициент качества трансформатора [6].

Основное применение этой серии – во входных мало-сигнальных трансформаторах, микрофонных усилителях, корректорах, согласующих трансформаторах после ЦАП, дифференциальных каскадах, каскадах SRPP, фазоинверторах, двухтактных PP-каскадах (межкаскадные и выходные трансформаторы) и т. д. без подмагничивания постоянным током.

Рассмотрим ламповый каскад, нагруженный на первичную обмотку трансформатора. Его можно представить как источник напряжения с выходным сопротивлением  $R_{\text{вых}}$ . Для простоты мы не рассматриваем нагрузку трансформатора. Нагрузка улучшает АЧХ и ФЧХ в области НЧ, но не меняет радикально суть процессов. Детально теория и расчет звуковых трансформаторов изложены в [14, 15, 17]. Для понимания процессов в первом приближении достаточно упрощенной эквивалентной последовательной схемы, представленной на рисунке 1.

Реальный дроссель (трансформатор) имеет сопротивление провода обмотки  $R_{\text{пров}}$  и сопротивление потерь в магнитопроводе  $R_{\text{пот}}$ . Как известно, вектор импеданса катушки индуктивности представляет собой геометрическую сумму активной и реактивной части (см. рис. 2):

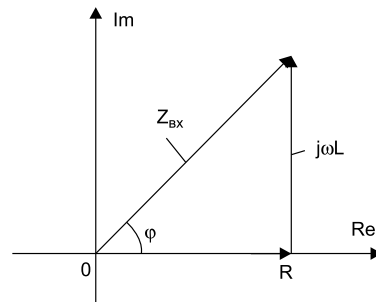


Рис. 2. Векторная диаграмма для импеданса катушки индуктивности

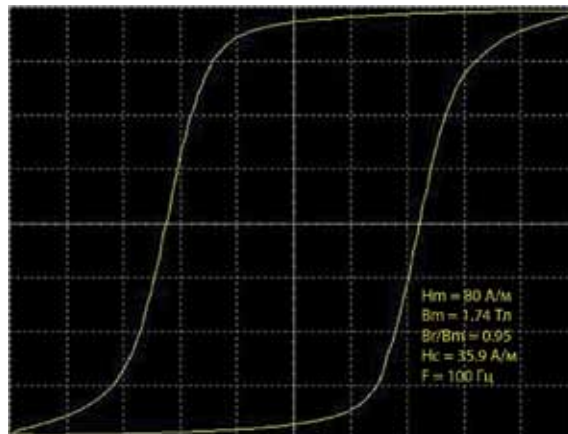


Рис. 3. Петля гистерезиса отожженной холоднокатанной трансформаторной стали (0,3 мм)

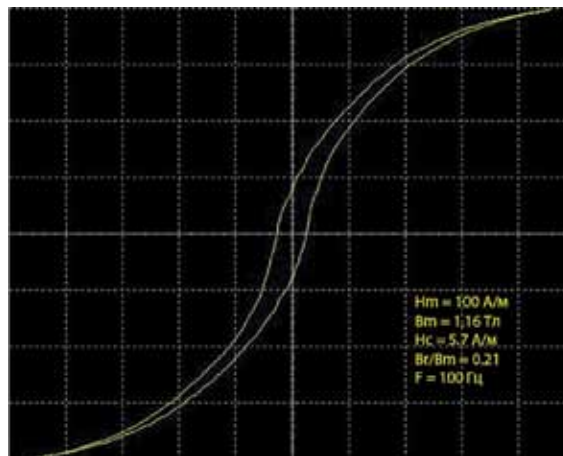


Рис. 4. Петля гистерезиса аморфного сплава на основе железа

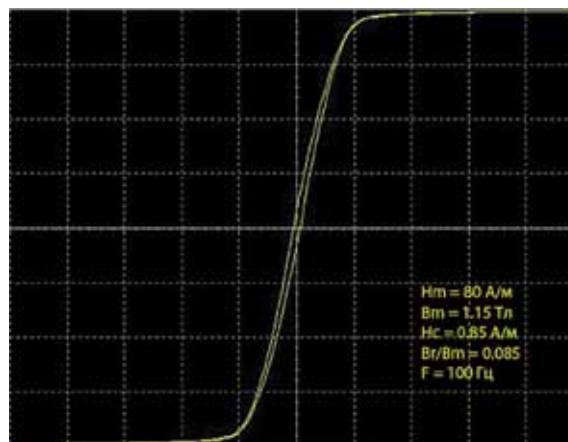


Рис. 5. Петля гистерезиса нанокристаллического сплава AMAF-200C серии MSTAN

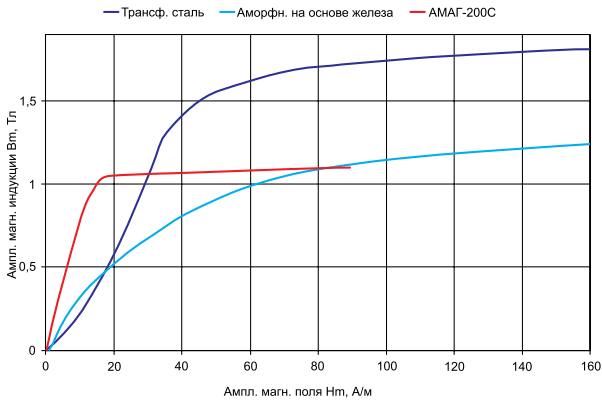


Рис. 6. Кривые намагничивания

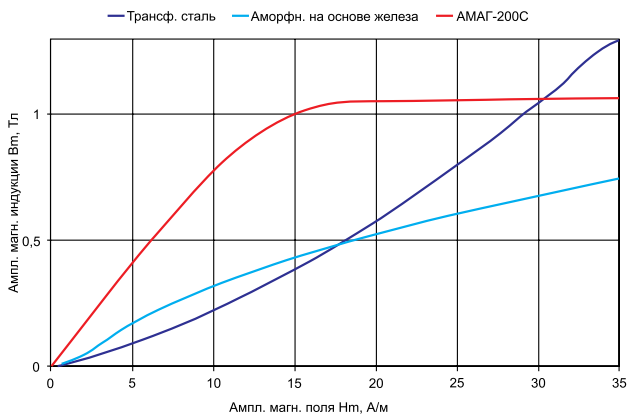


Рис. 7. Начальный участок кривых намагничивания

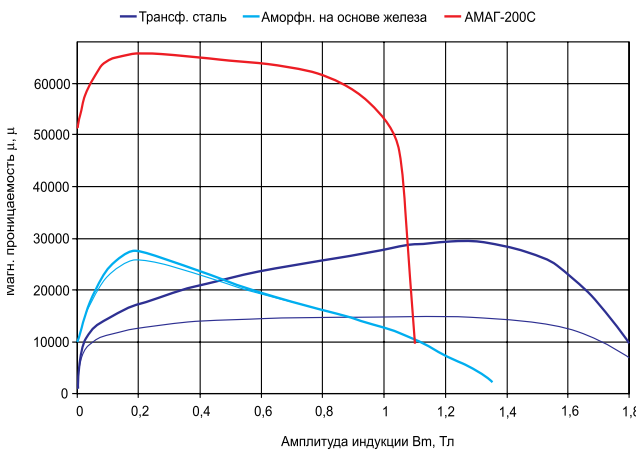


Рис. 8. Зависимость проницаемости от амплитуды индукции (F = 100 Гц)

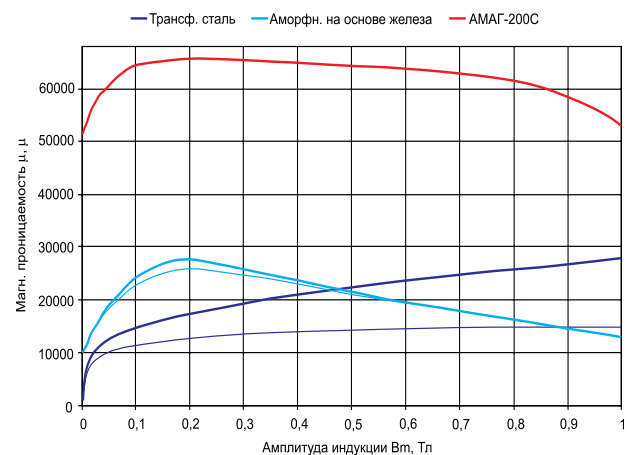


Рис. 9. Начальный участок зависимости проницаемости от амплитуды индукции (F = 100 Гц)

$$Z_{ex} = R + j\omega L \quad (1)$$

В нашем случае:

$$R = R_{пов} + R_{ном}$$

$$\varphi = \arctg(\omega L/R) \quad (2)$$

Для идеальной индуктивности, которая не имеет потерь в сердечнике и в проводе,  $R = 0$ ,  $\varphi = 90^\circ$ . Идеальная индуктивность линейна, т.е. не зависит от амплитуды индукции и частоты. В этом случае АЧХ и ФЧХ последовательной RL-цепи (см. рис. 1) определены отношением  $R_{вых}/\omega L$ . Это RL-фильтр высоких частот с граничной частотой  $F_0 = R_{вых}/2\pi L$ , на которой неравномерность АЧХ составляет 3 дБ, а сдвиг фазы равен  $45^\circ$ . Отсюда следует важный вывод: чтобы получить хорошую АЧХ и ФЧХ в области НЧ, следует либо понизить выходное сопротивление лампового каскада, либо увеличить индуктивность таким образом, чтобы граничная частота составляла единицы Гц.

В реальном дросселе (трансформаторе) потери возникают в проводе и сердечнике. Реальная индуктивность нелинейна, т.е. ее величина зависит от амплитуды индукции и частоты. Но для различных магнитомягких материалов эта зависимость не одинакова.

Сравним основные свойства трех материалов, часто применяемых в звуковых трансформаторах: 1) отожженная холоднокатаная трансформаторная сталь, толщина ленты: 0,3 мм; 2) аморфный сплав на основе железа, толщина ленты: 25 мкм; 3) нанокристаллический сплав АМАГ-200 С, толщина ленты: 20 мкм. Серия МСТАН. Типовые петли гистерезиса представлены на рисунках 3–5. Кривые намагничивания изображены на рисунке 6, начальный участок – на рисунке 7. Поскольку нас интересует отношение  $R_{вых}/\omega L$ , наибольший практический интерес представляет зависимость относительной магнитной проницаемости от амплитуды индукции и от частоты.

На рисунках 8–10 жирными линиями показан модуль комплексной относительной магнитной проницаемости (амплитудная проницаемость), который определяется из соотношения  $\mu = B_m/\mu_0 H_m$  и приводится производителями в спецификациях на различные сорта стали. Но индуктивность (и граничная частота) определяется не этой проницаемостью, а ее индуктивной частью. Ее называют упругой проницаемостью. Обозначим ее  $\mu'$ . На рисунках 8–10  $\mu'$  показана тонкими линиями. На рисунках 8–9 для АМАГ-200 С она практически совпадает с  $\mu$ . Так происходит потому, что потери в сердечнике на частоте 100 Гц ничтожно малы, угол сдвига между током и напряжением  $\varphi = 87^\circ$  (при  $B_m = 1$  Тл), а  $\text{tg}\delta = R_{ном}/\omega L = 0,05$ . Для сравнения, у стали при тех же условиях  $\varphi = 32^\circ$ ,  $\text{tg}\delta = 1,6$ . **Сопротивление потерь увеличивает выходное сопротивление лампового каскада, увеличивает граничную частоту, ухудшает АЧХ и ФЧХ.** Граничная частота уходит в слышимую область, появляются фазовые искажения. Однако сопротивление потерь для стали зависит еще и от амплитуды индукции. Это значит, что с ростом уровня сигнала изменяется сдвиг фазы и АЧХ! К примеру, в таблицах 2–3 представлена ФЧХ и АЧХ трансформатора при  $R_{вых} = 0,3 \omega L$  на частоте 100 Гц при одинаковой индуктивности обмотки (измеренной в точке  $B_m = 0,5$  Тл). Для стали величина фазового сдвига и спад АЧХ резко изменяются при изменении амплитуды индукции. Для АМАГ-200 С ФЧХ и АЧХ во всем диапазоне остаются близкими к расчетным значениям (для линейной RL-цепи: 16,5°; -0,56 дБ).

Для стали характерен резкий завал проницаемости при малых значениях амплитуды индукции. Магнитные домены в классических кристаллических материалах «прилипают», и требуется определенное стартовое усилие, чтобы сорентировать их. За счет этого снижается магнитная проницаемость и возникает «эффект первого Ватта». На малой громкости качество звука

резко снижается. Появляются нелинейные искажения, портится АЧХ и ФЧХ. Этот эффект отсутствует в нанокристаллических материалах, где нет обычной кристаллической решетки. Сверхмелкокристаллическая структура (10–20 нм) заложена в аморфную матрицу, домены очень подвижны и материалы хорошо работают в слабых полях [1].

Нелинейность кривой намагничивания стали и низкая проницаемость в начальной области приводят к трем видам искажений – *нелинейным, частотным и фазовым* [7]. Возникновение нелинейных искажений за счет нелинейности петли гистерезиса и влияние свойств материала на качество трансформатора хорошо описано в статьях [8, 9]. Важно, что величина искажений всех трех видов определяется отношением  $\omega L/R_{\text{вых}}$  [8]. Чем больше это отношение, тем ниже коэффициент нелинейных искажений, шире полоса частот в НЧ-области и меньше величина фазового сдвига, а также зависимость его от частоты (фазовые искажения). Вопрос искажений рассмотрим немного подробнее.

**1. Нелинейные искажения.** Нелинейная кривая намагничивания магнитного материала, означающая нелинейность импеданса цепи, приводит к искажениям формы тока. Для синусоидального входного сигнала этот ток вызывает несинусоидальное падение напряжения на выходном сопротивлении  $R_{\text{вых}}$  лампового каскада (см. рис. 1). Это падение напряжения вычитается из входного синусоидального сигнала. На первичную обмотку трансформатора поступает уже разностный искаженный сигнал, что вызывает нелинейные искажения на выходе [8]. Очевидно, что с ростом  $\omega L$  снижается ток и, соответственно, падение напряжения на выходном сопротивлении  $R_{\text{вых}}$ , что приводит к уменьшению искажений. Чтобы увеличить отношение  $\omega L/R_{\text{вых}}$  как правило, снижают  $R_{\text{вых}}$ , применяя более мощные лампы и используя обратную связь (ультралинейный каскад). Кроме того, увеличивают габариты сердечника и число витков. Тем самым снижают амплитуду индукции, стремясь работать на более линейном участке ПГ и расширить полосу частот до единиц Гц. Разумеется, преимущество высокой индукции стали при этом теряется, а трансформатор набирает вес. Однако очевидно, что увеличить  $\omega L/R_{\text{вых}}$  и уменьшить нелинейные искажения можно с помощью материалов с высокой проницаемостью (увеличивается индуктивность) и линейной петлей гистерезиса (исчезает сама причина нелинейных искажений).

**2. Частотные искажения.** В НЧ-области на частоте  $F_0 = R_{\text{вых}}/2\pi L$  возникает спад в 3 дБ (для ненагруженного трансформатора). Применяя нанокристаллические материалы, при небольшом количестве витков легко получить индуктивность 500–700 Гн. При этом значение  $F_0$ , как правило, составляет единицы Гц, и импеданс первичной обмотки практически не влияет на входное приведенное сопротивление трансформатора. Для нанокристаллических материалов в НЧ-области вследствие малых потерь импеданс в малой степени зависит от амплитуды индукции и частоты. При этом даже при одинаковой (по сравнению со сталью) индуктивности первичной обмотки (например, в SE с использованием зазора) за счет малых потерь полоса частот для нанокристаллического материала оказывается существенно шире в обе стороны. В ВЧ-области определяющими являются индуктивность рассеяния и приведенная емкость трансформатора. Высокая проницаемость заметно уменьшает рассеяние магнитного потока, обеспечивает хорошую электромагнитную связь и снижает величину индуктивности рассеяния. Для хорошей АЧХ на НЧ требуется меньшее количество витков, что, соответственно, уменьшает приведенную емкость трансформатора. Резонансная частота для тороидальных трансформаторов на основе нанокристаллического сплава значительно выше, чем у классических трансформаторов. Согласно данным [6], оптимальной является тороидальная форма сердечника. Например, типовое значение индуктивности рассеяния для выходных тороидальных трансформаторов из сплава с высокой магнитной проницаемостью составляет 1,3 мГн. Для сравнения, у классиче-

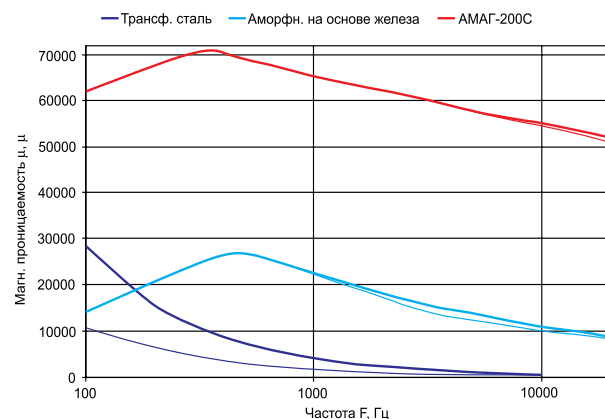


Рис. 10. Зависимость проницаемости от частоты при постоянном входном напряжении ( $B_m = 1$  Тл при  $F = 100$  Гц)

Таблица 2. ФЧХ, ° ( $F = 100$  Гц)

$B_m$ , Тл	0,01	0,05	0,1	0,5	1	1,5
Трансформаторная сталь	32	14,6	10,6	4,7	2,6	1,8
АМАГ-200С	17,5	16,6	15,9	15,8	16,7	–

Таблица 3. АЧХ, дБ ( $F = 100$  Гц)

$B_m$ , Тл	0,005	0,01	0,02	0,1	0,5
Трансформаторная сталь	–3,8	–2,8	–2,1	–1,8	–1,0
АМАГ-200С	–0,55	–0,51	–0,54	–0,57	–0,5

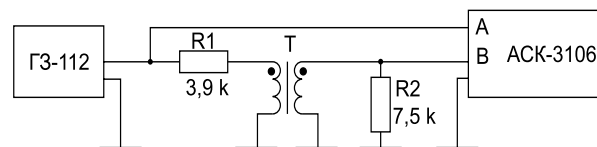


Рис. 11. Схема измерений

ских трансформаторов EI этот показатель равен 19 мГн [6]. Для нанокристаллических сплавов благодаря малой индуктивности рассеяния и малым паразитным емкостям частотный диапазон расширяется до частот порядка 200 кГц и выше. Эти частоты не слышны, но широкий диапазон важен для снижения фазовых искажений и обеспечения возможности работы с ООС [6].

**3. Фазовые искажения.** Их трудно заметить, работая с генератором синусоидального сигнала и осциллографом. Однако для сложного сигнала, например прямоугольного, представляющего собой набор гармоник, каждая гармоника сдвигается на разный угол, и в результате на выходе сигнал принимает совсем другую форму. Подробнее о фазовых искажениях см. [7]. С ростом  $\omega L$  сдвиг фазы уменьшается. На частоте  $F_0 = R_{\text{вых}}/2\pi L$  угол фазового сдвига для ненагруженного трансформатора составляет 45° (для нагруженного – меньше). Увеличивая индуктивность до сотен Гн, мы уводим частоту  $F_0$  в область инфразвука. Для такого трансформатора фазовый сдвиг в звуковом диапазоне 20 Гц...20 кГц приближается к нулю и мало зависит от частоты [6]. Таким образом, фазовые искажения в слышимой области отсутствуют.

Заметим, что для сигнала стабильной амплитуды с ростом частоты обратно пропорционально снижается амплитуда индукции ( $B_m = 1$  Тл при  $F = 100$  Гц;  $B_m = 0,01$  Тл при  $F = 10$  кГц), а это, в свою очередь, дополнительно снижает проницаемость стали (см. рис. 9). На высоких частотах сердечник всегда работает на начальном участке ПГ, где проницаемость стали уже на 100 Гц около 1000, а за счет потери на ВЧ она еще снижается. На рисунке 10 представлена фактическая зависимость упругой проницаемости  $\mu'$  от частоты при стабиль-

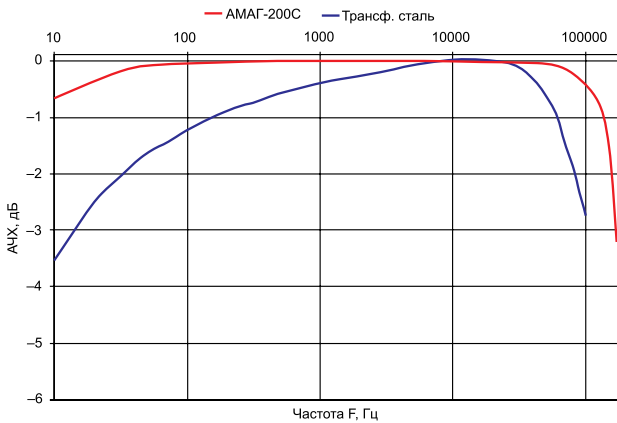


Рис. 12. АЧХ трансформаторов

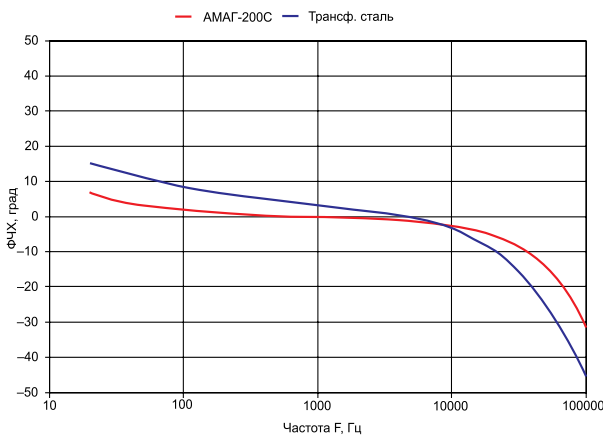


Рис. 13. ФЧХ трансформаторов

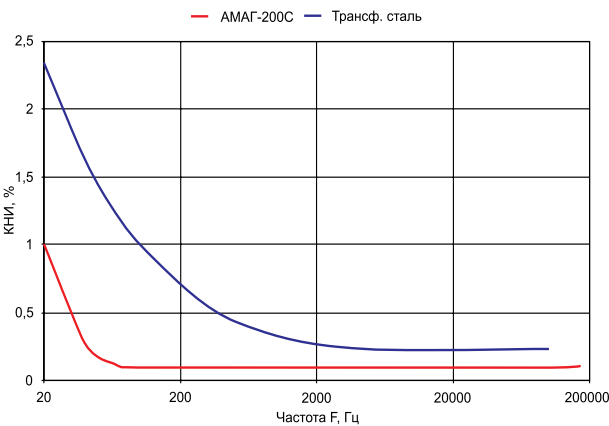


Рис. 14. КНИ трансформаторов

ном входном напряжении. Из-за уменьшения амплитуды индукции (см. рис. 10) проницаемость для АМАГ-200 С и аморфного сплава на основе Fe сначала растёт с увеличением частоты, а затем снижается. Для стали на частоте 100 Гц  $\mu' = 10600$ , на частоте 1 кГц  $\mu' = 1500$ , а на 10 кГц  $\mu' = 220$ ! Низкая проницаемость стали на ВЧ ухудшает электромагнитную связь, повышает индуктивность рассеяния, портит ФЧХ. В области ВЧ стальной сердечник уже практически не работает, передача сигнала, в основном, осуществляется через межобмоточную емкость. По этим причинам для получения хорошей АЧХ в области ВЧ в межкаскадных трансформаторах часто применяется бифилярная намотка. За счет большой распределенной емкости длинной связанной линии трансформаторы имеют хорошую АЧХ в области ВЧ. Некоторым любителям аудио звук бифилярных трансформаторов нравится, некоторым нет. Трудно судить, кто прав, но на материалах с малыми потерями и высокой проницаемостью в бифилярной намотке нет необходимости.

Другим классическим способом обеспечить хорошие свойства является секционирование слоями по толщине намотки с целью улучшить электромагнитную связь и снизить емкость. Конструкция таких трансформаторов далеко не проста. Характеристики в большой мере зависят от способов намотки, ее направления, материала изоляции, числа секций и способов их соединения [14–17]. В инвертирующем и неинвертирующем включении трансформатора характеристики могут быть совершенно разными. Например, известный производитель Hashimoto сообщает: «Методы намотки являются результатом многочисленных проб и ошибок. Конечной целью является определение наилучшей схемы, обеспечивающей минимальную индуктивность рассеяния и паразитную емкость. Конструкция содержит оптимально подобранное количество вертикальных и горизонтальных секций при оптимальном способе их чередования». Для тороидальных РР-трансформаторов при использовании высокочастотных магнитомягких материалов ситуация проще. Начальная проницаемость для серии MСТAN на частоте 100 кГц превышает 30000. В этом случае хороший межкаскадный трансформатор можно получить на торе, используя секционирование секторами по окружности, а не слоями по толщине обмотки. Например, тор делится на шесть секций по 60°. Секции первичной и вторичной обмоток чередуются: три секции первичной обмотки и три – вторичной. При этом распределенные емкости обмоток уменьшаются за счет последовательного соединения секций. Поскольку емкостная связь обмоток в данном случае, в основном, осуществляется через сердечник, межобмоточная емкость также мала за счет толщины материала контейнера магнитопровода. Например, для межкаскадного трансформатора на торе 60–40–30 мм (D–d–h) с двумя обмотками по 1000 витков межобмоточная емкость составляет около 75 пФ, что на порядок меньше емкости конструкций с секционированием по толщине обмотки и на два порядка меньше емкости бифилярных конструкций. За счет тороидальной формы сердечника, высокой проницаемости и чередования секций индуктивность рассеяния при этом составляет единицы мГн. Такой трансформатор работает на ВЧ за счет свойств магнитного материала сердечника, а не за счет емкостной и воздушной электромагнитной связи обмоток.

В качестве иллюстрации рассмотрим межкаскадный трансформатор для лампового каскада. Исходные данные: выходное сопротивление каскада: 3,9 кОм; приведенное входное сопротивление трансформатора: 15 кОм; сопротивление нагрузки: 7,5 кОм ( $K_{mp} = 1,43$ ); максимальное входное напряжение: 30 В на частоте 50 Гц. Возьмем два магнитопровода размером 45–25–20 (D–d–h) из АМАГ-200 С и отожженной трансформаторной стали (0,3 мм). При условии  $B_m = 1,0$  Тл на частоте 50 Гц при  $U_{ex} = 30$  В число витков обмоток  $W1 = 1000$ ,  $W2 = 700$ . Провод имеет диаметр 0,2 мм. Напомним, трансформатор на основе АМАГ-200 С выполнен с секционированием по окружности (шесть чередующихся секторов по 60°). Такой вариант для стали неприемлем в связи с малой проницаемостью на ВЧ. В трансформаторе на основе стали первичная обмотка разделена на две секции. Последовательность намотки: половина первичной обмотки по всему тору – вторичная – вторая половина первичной. Для АМАГ-200 С индуктивность первичной обмотки  $L = 110$  Гн, индуктивность рассеяния  $L_{pacc} = 9$  мГн, межобмоточная емкость  $C_{1-2} = 190$  пФ. Для стали, соответственно:  $L = 19$  Гн;  $L_{pacc} = 1,3$  мГн;  $C_{1-2} = 2500$  пФ. За счет отсутствия перекрытия обмоток [14] индуктивность рассеяния трансформатора на АМАГ-200 С выше, но межобмоточная емкость в 13 раз ниже. Испытания трансформаторов проводились по схеме, представленной на рисунке 11.

На рисунке 12 приведены АЧХ трансформаторов, на рисунке 13 – ФЧХ, на рисунке 14 – КНИ. На рисунках 15–16 – форма меандра на выходе трансформаторов. Заметим, для стали АЧХ и ФЧХ на низких частотах значительно проигрывают. А ведь мы не использовали весь запас индукции стали, взяв толь-

ко 1,0 Тл. Очевидно, чтобы улучшить характеристики по НЧ на стали, следует либо увеличить габариты трансформатора, либо число витков. Таким образом, высокая индукция стали для РР не дает выигрыша в габаритах и весе трансформатора.

### ВЫВОДЫ ПО МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ РР И ДРУГИХ КАСКАДОВ БЕЗ СМЕЩЕНИЯ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

#### 1. Трансформаторная сталь

Для двухтактного каскада трансформатор на основе стали дает худший результат и требует обязательных мер коррекции (обратная связь). В качестве мер улучшения ситуации в РР можно:

- выбрать марку стали с максимальной линейностью ПГ, максимальной начальной проницаемостью и минимальными потерями;
- использовать минимальную толщину ленты 0,08 мм и менее;
- использовать небольшой зазор для улучшения линейности;
- исключить использование неразрезного тора (любой рез дает эффективный зазор);
- использовать сдвиг рабочей точки по ПГ от нуля на наиболее линейный участок (за счет асимметрии плеч по постоянному току);
- увеличить вес и габариты для снижения размаха индукции;
- минимизировать выходное сопротивление лампового каскада;
- использовать составной магнитопровод из двух материалов.

Последний метод был описан в [10]. По своим магнитным свойствам составной сердечник из двух сердечников с одинаковой средней линией и площадью поперечного сечения  $S_1$ ,  $S_2$  эквивалентен сердечнику с площадью поперечного сердечника  $S = S_1 + S_2$  из магнитного материала, обладающего следующими характеристиками:

$$B = \eta_1 B_1 + \eta_2 B_2, \quad (3)$$

где  $\eta_1 = S_1/(S_1+S_2)$ ;  $\eta_2 = S_2/(S_1+S_2)$ .

Магнитная проницаемость такого сердечника:

$$\mu = \eta_1 \mu_1 + \eta_2 \mu_2. \quad (4)$$

Допустим, составной сердечник на 80% состоит из трансформаторной стали с начальной проницаемостью  $\mu_{нач1} = 1000$  и индукцией насыщения  $B_{s1} = 1,9$  Тл, а на 20% – из АМАГ-200 С, у которого  $\mu_{нач2} = 90000$  и  $B_{s2} = 1,2$  Тл. Тогда характеристики составного сердечника  $\mu_{нач} = 18800$ ,  $B_s = 1,76$ . Такой способ улучшает зависимость проницаемости от индукции, устраняет «эффект первого ватта» и снижает искажения за разумные деньги. При малой амплитуде индукции (высокие частоты или слабый сигнал) работает нанокристаллический материал, при высокой (низкие частоты с большой мощностью) – сталь. Сердечник имеет одновременно и высокую начальную проницаемость и достаточно высокую индукцию, что уменьшает требуемые габариты и цену.

#### 2. Аморфные сплавы на основе железа

В РР дают неплохие результаты за счет малой толщины ленты, небольших потерь, высокой начальной проницаемости, высокой индукции насыщения. Хорошее соотношение цена/качество. Желательно принимать меры к снижению выходного сопротивления лампового каскада, выбирать магнитопроводы с максимальной линейностью (оптимальный отжи), применять ООС.

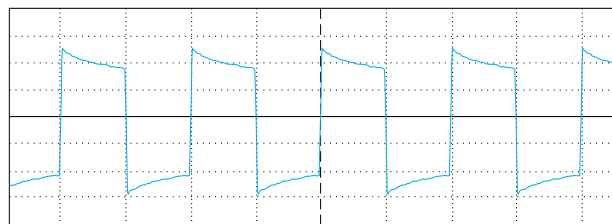


Рис. 15. Форма меандра с выхода трансформатора на основе стали (F = 1 кГц)

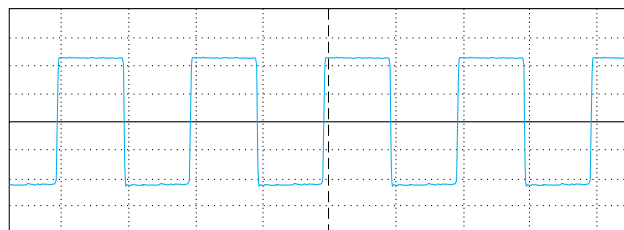


Рис. 16. Форма меандра с выхода трансформатора на основе АМАГ-200С (F = 1 кГц)

#### 3. АМАГ-200 С

Нанокристаллические материалы с высокой проницаемостью дают наилучший результат в РР, малые нелинейные, частотные и фазовые искажения даже без принятия мер по снижению выходного сопротивления и без использования обратной связи. Они обеспечивают минимальные размеры и вес тороидального трансформатора, отличный коэффициент качества, хорошую электромагнитную связь и малую индуктивность рассеяния, широкий частотный диапазон, малый шум, высокий КПД. Тороидальная форма сердечника является оптимальной [6, 11]. Однако эти материалы требуют обязательного принятия специальных жестких мер для симметрии плеч по постоянному току. Это очень важно, иначе хорошие характеристики не получить. Часто постоянный ток величиной 1–2 мА приводит магнитопровод к насыщению. В межкаскадных трансформаторах это 5–10% от тока покоя лампы. В выходных трансформаторах это уже 1–3%. Для хорошей работы выходного трансформатора необходимо обеспечить разбаланс тока покоя ламп не более 0,5% [6]. С этой целью применяются источники тока в анодах ламп или используются специальные модули смещения [6, 13].

Не всегда целесообразно обеспечивать самую высокую проницаемость. ОАО МСТАТОР выпускает ряд из пяти нанокристаллических материалов с индукцией около 1,2 Тл и различной проницаемостью (см. табл. 1). Применив материал с меньшей проницаемостью, можно, например, получить разумный компромисс по разбалансу тока покоя ламп или обеспечить работу с небольшим постоянным током смещения в межкаскадных трансформаторах SE.

#### Однотактные SE-каскады

В этом случае появляется неприемлемое для материалов с высокой проницаемостью требование – работа со смещением, что исключает применение неразрезного тора. Однако существует способ использовать все описанные преимущества материала за счет усложнения схемы. Это компенсация смещения от источника тока с высоким выходным сопротивлением. Такая конфигурация схемы упоминается в [12]. Компенсационная обмотка может иметь меньшее количество витков и, соответственно, больший ток. Необходимо, чтобы источник смещения имел высокое сопротивление и небольшую емкость, иначе он будет ощутимой дополнительной нагрузкой для лампового каскада.

Однако классически в SE применяются разрезные магнитопроводы с зазором. Зазор делает очень полезное дело – он линеаризует ПГ и уменьшает тангенс угла потерь (ПГ становится уже). В результате магнитная проницаемость слабо зависит от амплитуды индукции и от частоты. Вследствие этого заметно уменьшаются нелинейные, частотные и фазовые

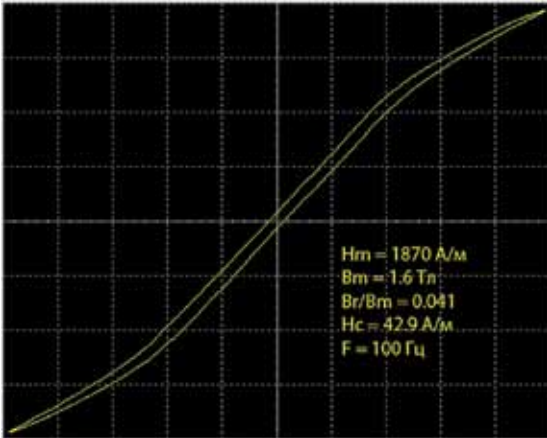


Рис. 17. Петля гистерезиса трансформаторной стали с зазором

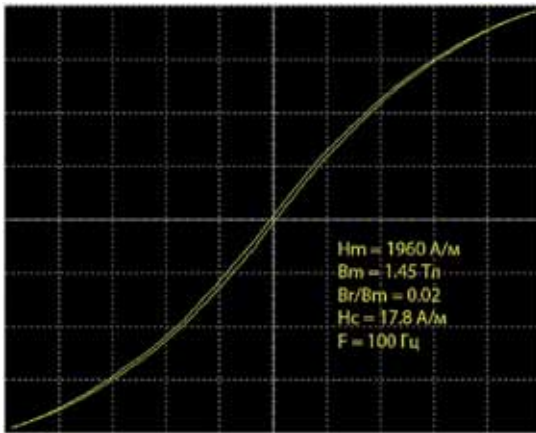


Рис. 18. Петля гистерезиса аморфного сплава на основе Fe с зазором

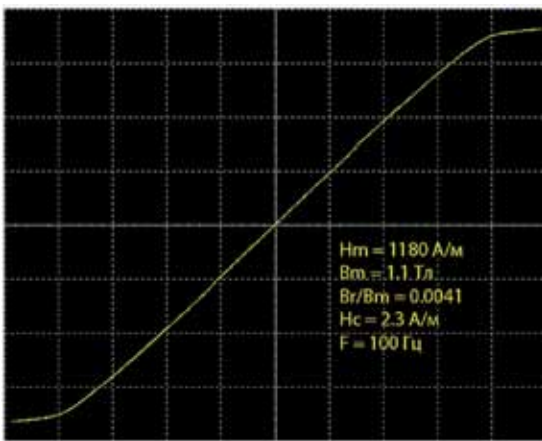


Рис. 19. Петля гистерезиса АМАГ-200С с зазором

искажения. Рабочий ток смещения в SE уводит рабочую точку с проблемного нуля на очень линейный участок.

К сожалению, немагнитный зазор уничтожает главное преимущество аморфных и нанокристаллических сплавов – высокую проницаемость. Она становится точно такой же, как у стали, и даже ниже, т.к. запас по индукции меньше. Высокая индукция обеспечивает неоспоримое преимущество стали – способность работать с наибольшим смещением и минимальные габариты трансформатора. С появлением зазора новые материалы не имеют преимуществ хорошей связи, индуктивность рассеяния повышается. Требуется специальные способы намотки, оптимальное секционирование и т.д., как и в случае со сталью. Но тогда имеется ли смысл использовать в SE новые материалы? Оказывается, имеется. На рисунке 17 представлена ПГ трансформаторной стали с зазором, на рисунке 18 – ПГ аморфного сплава

на основе Fe, на рисунке 19 – ПГ для сплава АМАГ-200 С. Зазор выбран так, чтобы проницаемость была сопоставима – около 850. Рабочая частота: 100 Гц. Петли разные и по ширине (потери), и по линейности. Дело в том, что исходная ПГ влияет на результирующую. Вспомним формулу для проницаемости тора с зазором:

$$\mu = \frac{l}{\delta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{l}{\mu_0}}, \quad (5)$$

где  $l$  – длина средней линии;  $\delta$  – зазор;  $\mu_0$  – исходная магнитная проницаемость.

В знаменателе имеется член, обратно пропорциональный исходной проницаемости до реза. С ростом исходной проницаемости он стремится к нулю, а петля приближается к линейной. Видно, что для АМАГ-200 С петля очень линейна и не имеет видимого глазом гистерезиса! Значит, высокая проницаемость материала все же работает, но в другом качестве. В двухтактных каскадах без смещения мы заметно уменьшили нелинейные, частотные и фазовые искажения за счет большой индуктивности и очень малого падения напряжения на выходном сопротивлении лампового каскада. В SE каскадах мы опять получим лучший результат по качеству, но за счет отличной линейности петли и ничтожно малого тангенса угла потерь. На рисунке 20 приведена зависимость модуля комплексной относительной магнитной проницаемости от амплитуды индукции. На рисунке 21 показана зависимость проницаемости от частоты. Для АМАГ-200 С эти зависимости очень незначительны, т.е. это почти идеальная линейная индуктивность! Как следствие, в принципе отсутствуют искажения всех трех упомянутых выше видов. Для стали с зазором на частоте 100 Гц проницаемость в гораздо меньшей степени зависит от амплитуды индукции, чем для стали без зазора (см. рис. 8). Отношение максимальной проницаемости к начальной составляет около 1,5,  $\text{tg} \delta \approx 0,07$ , и это уже хорошо. Однако существует значительная зависимость  $\text{tg} \delta$  и, соответственно, угла фазового сдвига  $\phi$  между током и напряжением от частоты  $F$  (см. рис. 22). Зазор уменьшил фазовые искажения, но не устранил их полностью. Возможно, поэтому некоторые аудиолюбители предпочитают пентоды с высоким выходным сопротивлением, которые уменьшают эти фазовые искажения и частично компенсируют безобразную зависимость импеданса динамиков от частоты (режим источника тока), т.к. сила Ампера зависит от тока, а не от напряжения.

### ВЫВОДЫ ПО ОДНОТАКТНЫМ КАСКАДАМ

- 1. Трансформаторная сталь.** При наличии зазора она дает неплохие результаты, минимальный вес и габарит трансформатора. Хорошее соотношение цена/качество. Следует принять дополнительные меры для снижения фазовых искажений, использовать максимально линейный участок ПГ, выбрать сталь с минимальной толщиной ленты и максимальной линейностью ПГ.
- 2. Аморфные материалы на основе Fe.** За счет сравнимой со сталью индукции, высокой начальной проницаемости и малых потерь – хороший вариант для выходных трансформаторов. Лучшее соотношение цена/качество, малые искажения.
- 3. Нанокристаллические материалы с высокой начальной проницаемостью и зазором.**

*Преимущества:* отличные характеристики за счет идеально линейной ПГ и ничтожных потерь. Минимальные искажения. Индуктивность линейна.

*Недостатки:* большие габариты и вес относительно стали и аморфных материалов за счет меньшей индукции. Высокая цена. Как и сравниваемые материалы, требуют очень качественной намотки с соблюдением всех мер снижения паразитных емкостей и индуктивности рассеяния.

И, наконец, информация к размышлению по поводу альтернативы зазору. Традиционно считалось, что любой ферромаг-

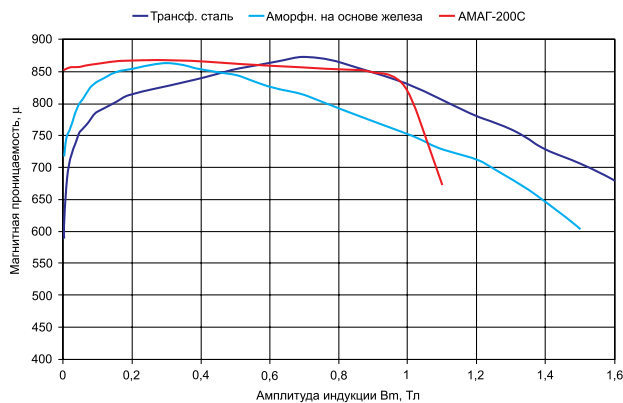


Рис. 20. Зависимость проницаемости от амплитуды индукции для сердечников с зазором

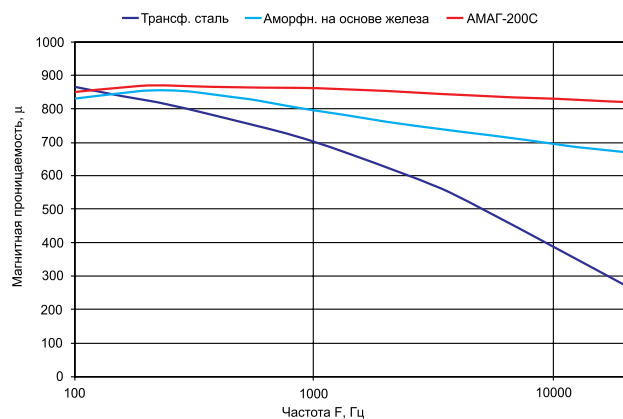


Рис. 21. Зависимость проницаемости от частоты для сердечников с зазором

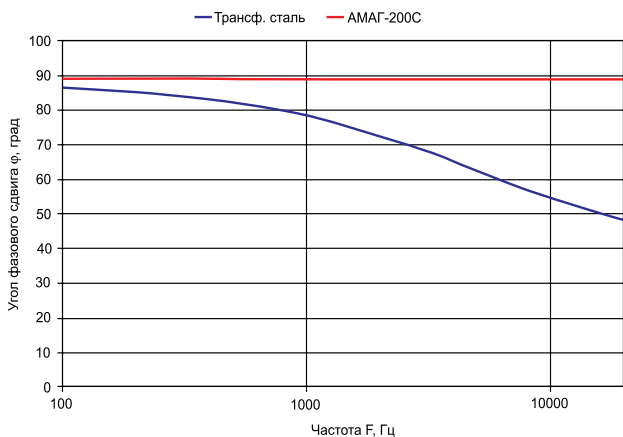


Рис. 22. Зависимость угла сдвига фазы между током и напряжением от частоты для дросселя (трансформатора) с зазором

нетик – очень нелинейный элемент, и потому он всегда вносит нелинейные искажения [8, 9]. Однако благодаря дальнейшему развитию технологий освоено серийный выпуск современных материалов с линейной петлей гистерезиса и достаточно малой проницаемостью. Малая проницаемость и линейность обеспечиваются не зазором, а составом и термомагнитной обработкой. Например, аморфный железоникелевый сплав АМАГ-223 имеет проницаемость 1800, индукцию насыщения – 1,35, малые потери и линейную петлю гистерезиса (см. рис. 23). Для АМАГ-223 при изменении амплитуды индукции в диапазоне 0,05–1,1 Тл магнитная проницаемость  $\mu$  меняется в пределах 1920...1800.

Более дорогие аморфные сплавы на основе кобальта АМАГ-186 С, АМАГ-186 В, АМАГ-186 А имеют индукцию насыщения, соответственно, 1,0; 0,9; 0,85 Тл и проницаемость, соответственно, 1400; 2200; 3300. Эти материалы успешно используются в прецизионных датчиках тока, имеют линейную

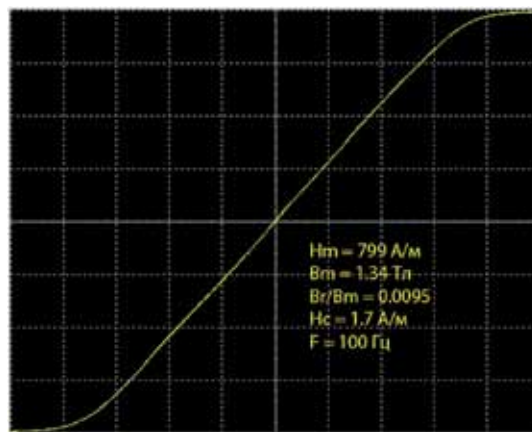


Рис. 23. Петля гистерезиса железо-никелевого сплава АМАГ-223

ПГ, схожую по форме с АМАГ-223 (см. рис. 23), и также могут применяться в SE-каскадах со смещением по постоянному току, например в межкаскадных трансформаторах.

В ближайшее время на сайте МСТАТОРа в группе «Дизайн-центр» планируется выложить упрощенный калькулятор (в Microsoft Excel) для приближенного расчета тороидальных звуковых трансформаторов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Аморфные и нанокристаллические магнитомягкие сплавы//www.mstator.ru.
2. Ленты аморфных и нанокристаллических сплавов АМАГ//www.mstator.ru.
3. Э. Фоченков. Программы расчета точечных изделий в импульсных преобразователях. Электронные компоненты. № 2. 2014.
4. Э. Фоченков. Применение аморфных магнитопроводов насыщения серии MSSA в многоканальных импульсных источниках питания//www.mstator.ru.
5. Э. Фоченков. Применение малогабаритных помехоподавляющих магнитопроводов из аморфных металлических сплавов». Радио. № 2. 2003.
6. Ir. Menno Van der Veen. Wide bandwidth toroidal audio signal transformers. Lecture by the designer//www.trafco.rs/tubeaudio-ru.php.
7. Е. Снузицев. Частотные, нелинейные и фазовые искажения//www.musicangel.ru.
8. James Moir. GA3. 1994. Выходные трансформаторы//www.musicangel.ru.
9. Трансформаторы в одноканальных усилителях. Dr. Tom Hodson. Single-ended Amplifiers, Feedback and Horn: Some History». Sound Practices. Spring. 1994//www.musicangel.ru.
10. М. А. Розенблат. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М. «Наука». 1966.
11. Ir. Menno Van der Veen. Modern High End Valve Amplifier based on toroidal output transformers//www.mennovanderveen.nl.
12. Ir. Menno Van der Veen. Universal system and output transformer for valve amplifiers. 118th AES Convention 2005. Barcelona. Paper 6347//www.mennovanderveen.nl.
13. Ir. Menno Van der Veen. Why auto-bias sounds so good//www.mennovanderveen.nl.
14. Ю. Н. Стародубцев. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. ИП РадиоСофт. 2005.
15. Ю. С. Русин. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. Л. Энергия. 1973.
16. Ю. С. Русин. Определение собственной емкости обмоток. Радиотехника. № 2. 1964.
17. Г. С. Цыкин. Трансформаторы низкой частоты. Теория, расчет и конструирование. М. Связьиздат. 1955.
18. В. С. Чернов, О. Г. Иванов и др. Российские аморфные и нанокристаллические магнитные материалы: Физические свойства и применение. М. Научное издание. № 10. 2008.