

# Нанокристаллические материалы в синфазных дросселях

Эдуард ФОЧЕНКОВ

**В настоящей статье описываются физические свойства витых тороидальных магнитопроводов серии MSFN из нанокристаллической ленты АМАГ 200С и синфазных дросселей ДС2, ДС3 на их основе, выпускаемых российским предприятием ПАО «МСТАТОР», в сравнении с лучшими импортными ферритами. Предлагаются рекомендации по импортозамещению.**

## Почему не феррит?

Часто говорят, что новые аморфные и нанокристаллические материалы вытеснят и скоро полностью заменят феррит. Это совсем не так.

Феррит имеет ряд неоспоримых преимуществ, которые надолго гарантируют ему широкую нишу на рынке сбыта:

- низкая цена;
- разнообразие вариантов формы магнитопровода — тор, Ш-образный, броневой, низкопрофильные печатные трансформаторы и т.д.;
- большое разнообразие марок феррита, позволяющее сделать оптимальный выбор под разные задачи;
- жесткость и устойчивость к механическим воздействиям;
- развитое информационное и программное обеспечение, доступная методика расчета.

В той части РЭА, где отсутствуют жесткие требования к снижению массогабаритных показателей и помех, повышению КПД и надежности, улучшению функциональных характеристик, расширению частотного и температурного диапазона и т.д., в настоящее время применяют и еще долго будут применять феррит.

Тем не менее современные аморфные и нанокристаллические материалы имеют ряд уникальных свойств, которые в принципе не доступны ферритам:

- есть материалы с очень высокой магнитной проницаемостью (до миллиона), которая на два порядка больше, чем у ферритов;
- есть материалы с низкой проницаемостью (около 200) и линейной петлей гистерезиса (ПГ);
- есть материалы с высокой индукцией насыщения, которая больше, чем у феррита, в 3–4 раза (1,2; 1,5 Тл и выше);
- оптимальная форма ПГ (прямоугольная, плоская линейная, классическая округлая — как у феррита и др.). Не меняя ма-

териал, можно получать ПГ разной формы, оптимизированные под конкретную задачу, путем изменения режима термомагнитной обработки (отжига);

- потери ниже, чем у ферритов;
- отрицательный температурный коэффициент потерь, обеспечивающий стабилизацию температурного режима, что исключает критический разогрев трансформаторов и дросселей;
- высокая температура Кюри (до 600 °С), что позволяет работать в расширенном диапазоне температур –60...300 °С.

Эти уникальные свойства в некоторых применениях не имеют альтернативы и дают совершенно новый качественный уровень аппаратуры. Именно эти критичные применения и обеспечивают непрерывно растущий рынок сбыта новых материалов.

## Ассортимент на российском рынке

ПАО «МСТАТОР» выпускает 23 наименования аморфных и нанокристаллических лент под разные технические задачи. На основе этих лент в настоящее время выпускаются 14 серий магнитопроводов, оптимизированных под определенное применение [1].

Наиболее востребованные магнитопроводы можно разделить на три основные группы:

- магнитопроводы для импульсных источников питания (ИИП), в том числе фильтров ЭМС (серии MSFN, MSTN, MST, MSSA, MSSN, MSK, MSB, MSC, MSC-NG, MSCN-TH);
- магнитопроводы для трансформаторов тока (серия MSFN, MST);
- магнитопроводы для аудиотехники (серия MSTAN).

Рассмотрим первую группу, которую предлагает предприятие «МСТАТОР» для импульсных источников питания (рис. 1).

Это:

- магнитопроводы для синфазных дросселей (1);
- магнитопроводы для дифференциальных дросселей (2, 7, 3);

- магнитопроводы для силовых трансформаторов (4);
- магнитопроводы для дросселей магнитных усилителей (5);
- помехоподавляющие магнитопроводы (6).

## АМАГ 200С в синфазных дросселях

Одна из самых востребованных серий магнитопроводов — это серия MSFN для синфазных дросселей на основе нанокристаллической ленты АМАГ 200С. Подобные дроссели широко применяются в качественных фильтрах радиопомех.

Второе массовое применение серии MSFN — в трансформаторах тока, где востребована высокая начальная проницаемость и температурная стабильность.

На сегодняшний день подавляющее большинство производителей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) отказывается от классических трансформаторных источников питания и использует импульсные источники питания (ИИП), снижая тем самым габариты, вес и цену аппаратуры. **Но ИИП создают высокочастотные помехи!** Часть из них попадает по проводам питания в сеть, и она становится передающей антенной радиопомех, а часть излучается собственными проводниками и компонентами ИИП. Это создает проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) устройств, питающихся от общей электросети. В некоторых чувствительных к помехам устройствах возникают сбои, или они вообще теряют работоспособность [2].

Существуют нормы на величину создаваемых помех. Это очень большая проблема и высокая ответственность. В некоторых странах существует даже уголовная ответственность за нарушение нормативов излучаемых помех. Ведущие мировые фирмы-производители магнитных материалов, магнитопроводов и электромагнитных компонентов Vacuumschmelze, Magnetec, Wurth, Hitachi и др. предлагают для помехоподавляющих

## МАГНИТОПРОВОДЫ

ИЗ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

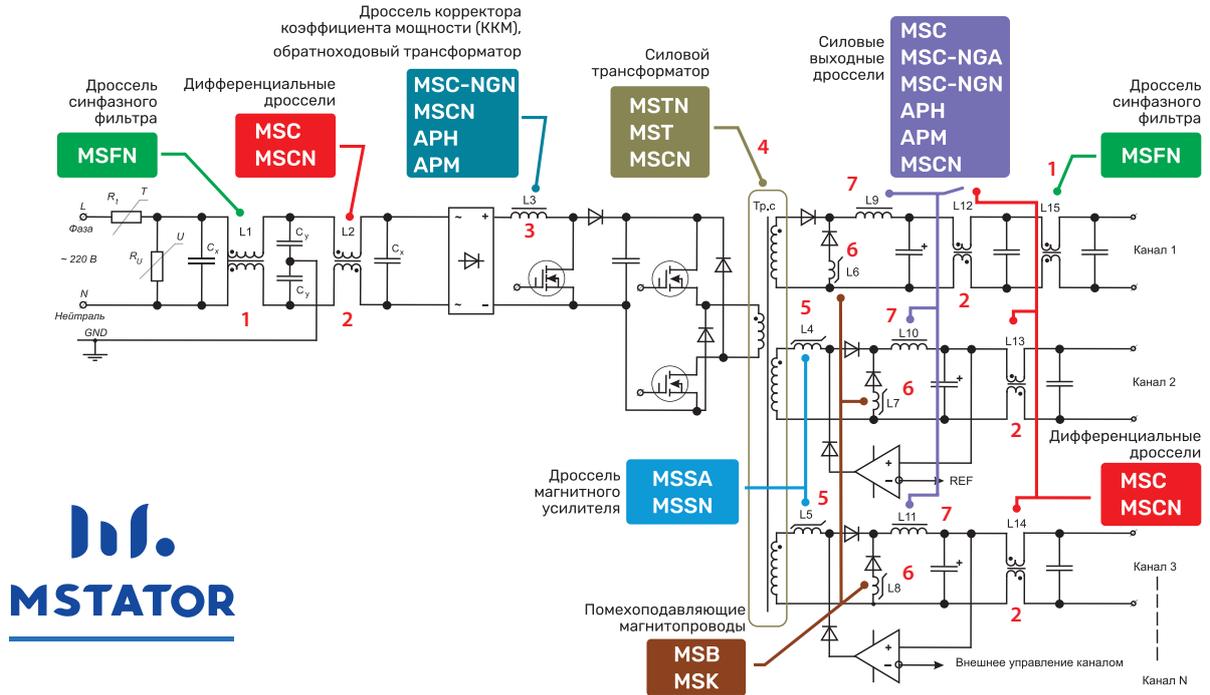


Рис. 1. Применение магнитопроводов ПАО «МСТАТОР» в ИИП

фильтров синфазные дроссели на основе сердечника из нанокристаллического материала [3].

Что это дает? Есть ли смысл менять привычный феррит?

Отвечая на поставленные вопросы, поговорим о применении серии магнитопроводов MSFN в синфазных дросселях и приведем сравнение с одним из лучших ферритов, используемых в подобных дросселях ведущими европейскими производителями.

Серия MSFN — это тороидальные магнитопроводы, навитые из тонкой (16÷18 мкм) нанокристаллической ленты АМАГ 200С в пластмассовом контейнере. Контейнер защищает сердечник от механического воздействия при намотке толстым проводом и обеспечивает хорошую изоляцию обмоток. Отжиг оптимизирован для получения высокой начальной магнитной проницаемости. Индукция насыщения: 1,16 Тл.

### Сравнение материалов на практике

Сравним два близких по размерам магнитопровода.

1. Кольцо из феррита ЭМС с покрытием эмалью, магнитной проницаемостью около 5000 и размерами 42,5–25,5–13,1 мм (D–d–h).
2. Магнитопровод MSFN-37S-TH в пластмассовом контейнере размерами 39,8–20,3–12,7 мм. Размеры сердечника без контейнера: 37–23–10 мм. Коэффициент заполнения: около 0,72 (учитывает воздушные зазоры между витками тонкой ленты).

На рис. 2 представлена типичная зависимость  $\mu'$  и  $\mu''$  от частоты магнитопроводов серии MSFN из ленты АМАГ 200С. Действительная (индуктивная) начальная магнитная проницаемость магнитопроводов MSFN, в отличие от феррита (рис. 3), значительно падает с ростом частоты (рис. 2):

$$\mu' = 100\,000 \text{ на частоте } 50 \text{ Гц;}$$

$$\mu' = 85\,000 \text{ на частоте } 10 \text{ кГц;}$$

$$\mu' = 26\,500 \text{ на частоте } 100 \text{ кГц.}$$

Однако важна не проницаемость материала сама по себе, а импеданс. Высокий импеданс дросселя в сочетании с низким волновым сопротивлением линии и низким импедансом конденсаторов обеспе-

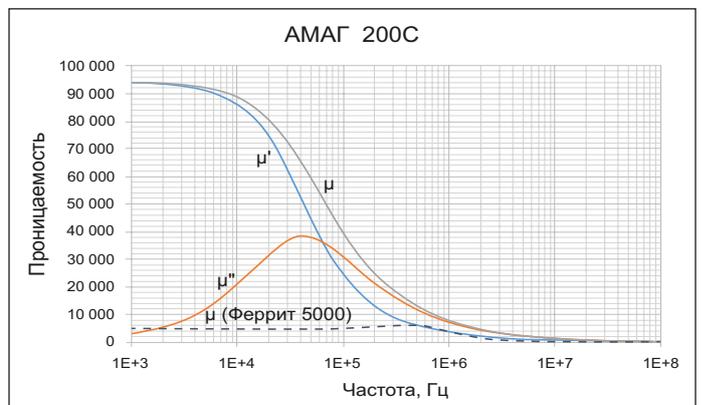


Рис. 2. Зависимость проницаемости от частоты для материала АМАГ 200С

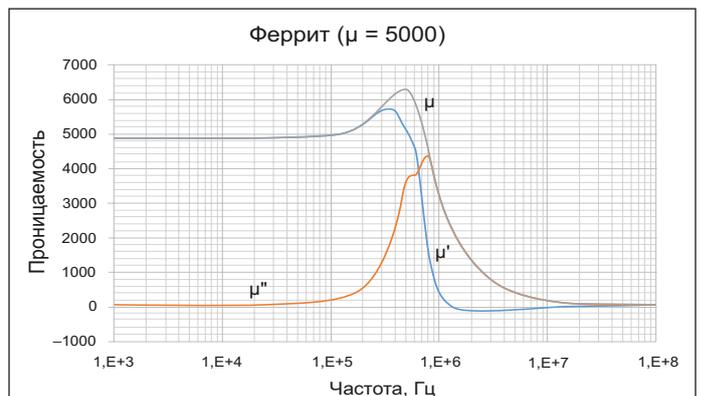


Рис. 3. Зависимость проницаемости от частоты для феррита ( $\mu = 5000$ )

чивает хорошее подавление помех. Импеданс — это вектор из двух составляющих: индуктивной (действительная часть) и потерь (мнимая часть). Импеданс пропорционален произведению проницаемости на частоту. Действительная часть проницаемости  $\mu'$  падает медленнее, чем растет частота. К тому же, на высоких частотах быстро увеличивается вклад мнимой части магнитной проницаемости  $\mu''$ , определяемой потерями. В результате модуль импеданса с увеличением частоты непрерывно растет до частот в несколько сотен МГц (рис. 4). На низких частотах импеданс определяется, в основном, величиной  $\mu'$ , а на высоких —  $\mu''$ .

На рис. 3 представлена зависимость проницаемости от частоты феррита ЭМС с проницаемостью 5000. Заметим, что до частоты 100 кГц полная проницаемость  $\mu$  стабильна и практически не зависит от частоты: она определяется действительной (индуктивной) составляющей проницаемости  $\mu'$ . Однако далее с возрастанием частоты проницаемость сначала увеличивается, а затем резко падает. И уже в точке 1,3 МГц действительная часть проницаемости  $\mu'$  становится отрицательной. Таким образом, индуктивный характер импеданса дросселя меняется на емкостной, что хорошо видно на зависимости импеданса и фазы от частоты (рис. 4). Это явление определяется резонансом магнитного материала, характерным для феррита [4]. Причем, чем выше проницаемость феррита, тем ниже частота резонанса. Обычно она находится в диапазоне частот 0,5–2 МГц. Следовательно, не всегда оправдано применение ферритов с очень высокой проницаемостью, так как при этом снижается диапазон частот дросселя. К тому же, чем выше проницаемость феррита, тем хуже температурная стабильность. Проницаемость феррита в диапазоне рабочих температур может изменяться в несколько раз. Это подробнее мы обсудим ниже.

Заметим, что у нанокристаллического одновиткового дросселя не существует резонанса, фаза всегда положительна до частоты около 900 МГц (рис. 4). Резонанс на частоте 900 МГц возникает не за счет свойств магнитного материала, а благодаря свойствам провода [5]. Мы использовали один виток провода длиной около 7 см. Поскольку он применялся для обоих сердечников, из рис. 3 видно, что выше 900 кГц форма графика модуля импеданса практически одинакова.

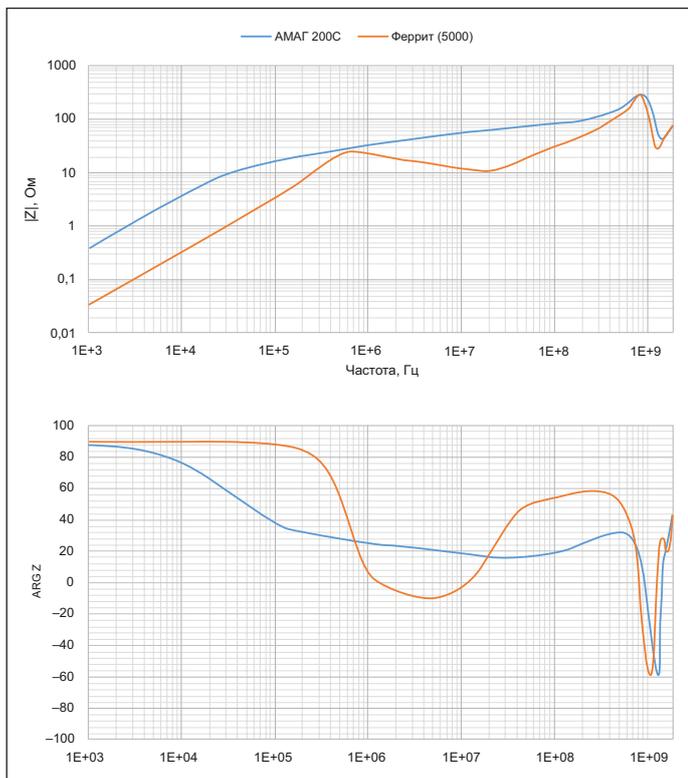


Рис. 4. Зависимость модуля и фазы импеданса от частоты одновиткового дросселя на основе АМАГ 200С и феррита с проницаемостью 5000

ва. В этой части частотного диапазона свойства дросселя в большей степени определяются свойствами провода, а не характеристиками магнитного материала. Подробнее см. [5, 6].

Исходя из названных причин, можно сделать вывод, что на описываемом ферритовом кольце невозможно изготовить синфазный дроссель с резонансной частотой выше 1,3 МГц. Это ограничение определено свойствами магнитного материала. В отличие от феррита, нанокристаллический сердечник не имеет резонанса [5], и резонанс синфазного дросселя определяется свойствами обмотки, в первую очередь, длиной и емкостью провода [5, 6]. При небольшом количестве витков можно изготовить дроссель с частотой резонанса в несколько десятков МГц.

Для сравнения свойств дросселей нанесем обмотки на используемые сердечники так, чтобы индуктивности были примерно одинаковы на частоте 100 кГц. На рис. 5–6 показаны частотная зависимость фазы импеданса и затухания в линии 50 Ом. Измерения сделаны векторным анализатором S5045 в диапазоне частот 10 кГц...100 МГц.

Дроссель на феррите имеет обмотку в 17 витков провода диаметром 0,85 мм, индуктивность 1,62 мГн (100 кГц) и частоту резонанса около 1 МГц. Дроссель на АМАГ 200С имеет 10 витков, индуктивность 1,67 мГн (100 кГц), частоту резонанса около 8 МГц.

Заметим, что при близких размерах и практически одинаковой индуктивности кривые затухания дросселей различаются (рис. 5). Это определяется свойствами магнитного материала. Ферритовый дроссель имеет хорошее затухание в узком ча-

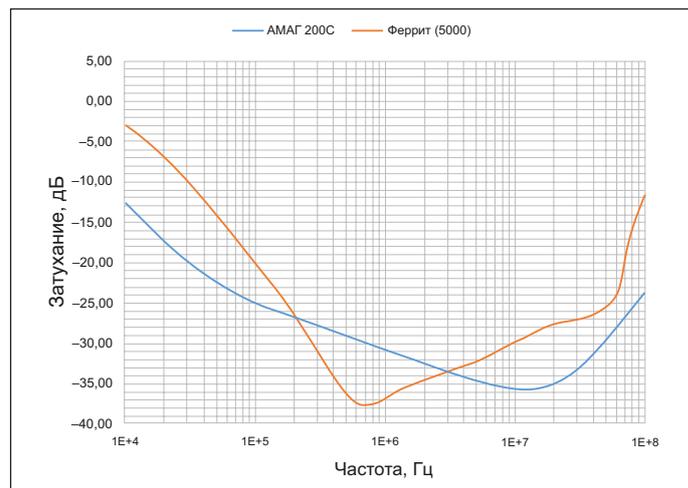


Рис. 5. Зависимость затухания дросселей от частоты (линия 50 Ом)

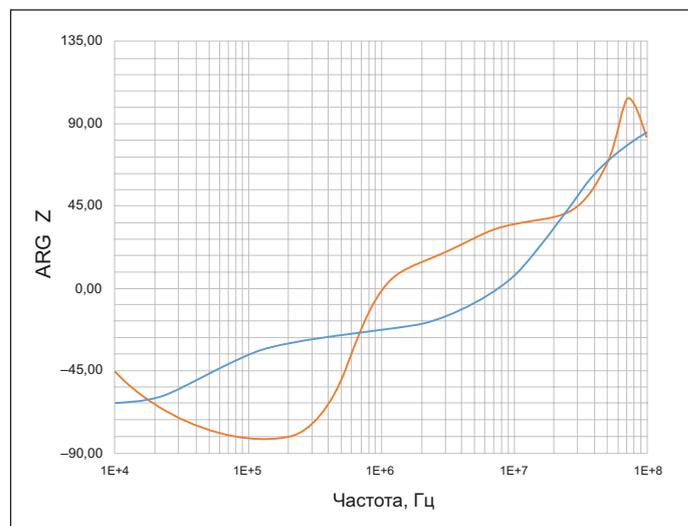


Рис. 6. Зависимость фазы импеданса дросселей от частоты (линия 50 Ом)

стотном диапазоне 200 кГц...3 МГц на частотах близких к резонансной. Нанокристаллический дроссель обеспечивает хорошее затухание в очень широком частотном диапазоне. В нижней части диапазона это достигается за счет высокой начальной магнитной проницаемости  $\mu'$  (около 100 000), а в верхней — за счет короткого провода, высокой мнимой части проницаемости  $\mu''$  и отсутствия резонанса в магнитном материале.

Рассмотрим, к примеру, практическую задачу. Требуется для линии (50 Ом) изготовить дроссель с затуханием на уровне  $-30$  дБ в широком диапазоне частот. Для этого мы увеличим индуктивность и сделаем два дросселя с индуктивностью 10 мГн на частоте 100 кГц. У АМАГ 200С обмотка рядовая однослойная в 25 витков проводом диаметром 0,85 мм.

В случае использования феррита получается 41 виток того же провода, причем в один слой витки на половине кольца (синфазный дроссель имеет две или более обмоток) не помещаются, поэтому обмотка двухслойная. Двухслойная обмотка сама по себе увеличивает паразитные параметры и снижает существенно частоту резонанса дросселя относительно рядовой однослойной обмотки. Следовательно, если разместить 41 виток одним слоем по всему кольцу, частота резонанса будет выше. В этом смысле нанокристаллические сердечники имеют дополнительное преимущество. За счет малого числа витков и рядовой однослойной намотки резонансная частота увеличивается. При этом, разумеется, снижаются и тепловые потери в обмотке.

Для ферритового дросселя (рис. 7) характерен резкий рост затухания в узком диапазоне частот вблизи резонансной (350 кГц). Для нанокристаллического дросселя резонансная частота в 4,6 раза выше (1,6 МГц), и хорошее подавление помех наблюдается в широком диапазоне частот. Так, диапазон частот феррита по уровню  $-30$  дБ составляет 54 кГц...2,9 МГц (перекрывание по частоте в 54 раза). У нанокристаллического дросселя частотный диапазон по уровню  $-30$  дБ равен 13,7 кГц...48 МГц (перекрывание по частоте 3504 раза). Таким образом, используя дроссель близкого размера из материала АМАГ 200С, мы расширили частотный диапазон в 65 раз.

Российский ГОСТ, нормирующий промышленные радиопомехи, рассматривает полный частотный диапазон 9 кГц...1 ГГц, разбивая источники помех на классы в зависимости от диапазона. Для большинства оборудования верхняя граница диапазона ограничена значением 30 или 100 МГц, а нижняя — 9 или 150 кГц. Нанокристаллические материалы создают уникальные возможности подавления радиопомех в очень широком диапазоне частот. Заметим, что при увеличении индуктивности дросселя в любом случае снижается резонансная частота и верхняя граница диапазона частот. По этой причине в экстремально широкой полосе частот используются двухзвенные фильтры (два дросселя с разной резонансной частотой).

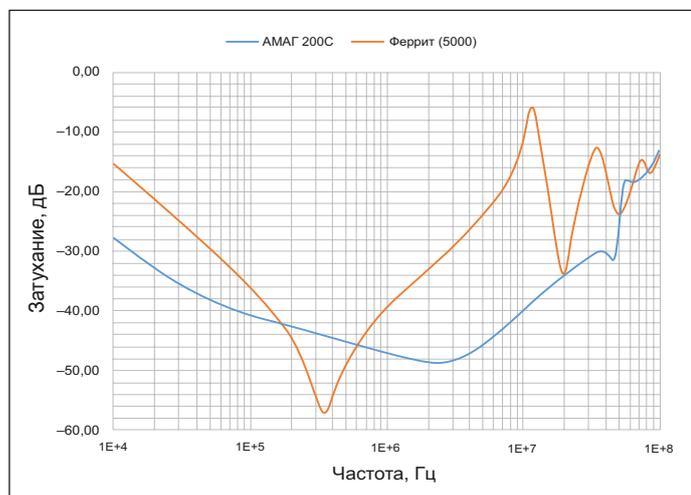


Рис. 7. Зависимость затухания от частоты (линия 50 Ом)

В рабочем режиме синфазный дроссель нагревается за счет рабочего тока. Посмотрим, как изменяются характеристики при нагреве. Мы нагрели оба дросселя паяльным феном до  $100$  °С. На рис. 8 показана зависимость затухания от частоты при комнатной температуре и при  $100$  °С для феррита. На разных частотах изменения разные. На частоте 100 кГц и ниже затухание увеличилось за счет роста импеданса (изменение импеданса: около 26%), а в диапазоне близком к частоте резонанса затухание резко падает (в точке резонанса на частоте 360 кГц снижение импеданса в 3,1 раза, что дает снижение затухания на 9,8 дБ). На частотах выше 1 МГц затухание практически не изменяется.

У дросселя на основе АМАГ 200С (рис. 9) на частоте 100 кГц затухание снижается на 1 дБ (импеданс изменяется примерно на 12%), в точке резонанса на частоте 1,6 МГц снижение составляет 0,6 дБ, а выше 2 МГц изменений практически нет. В рамках этого исследования мы не смотрели характеристики на отрицательных температурах, но автор приводит данные, полученные ранее на других дросселях с этими же материалами (рис. 10–11). При отрицательных температурах для феррита характерно резкое снижение импеданса и затухания в диапазоне ниже частоты резонанса. Эта частота возрастает, и резонанс становится более выраженным (рост максимума импеданса — в 2 раза). АМАГ 200С ведет себя стабильно и предсказуемо в широком диапазоне температур  $-60...125$  °С.

При проектировании синфазных дросселей с нанокристаллическим сердечником взамен феррита возможны три стратегии.

1. Получение максимального преимущества в характеристиках при сохранении размеров дросселя. Резонансная частота возрастает в 5–8 раз.

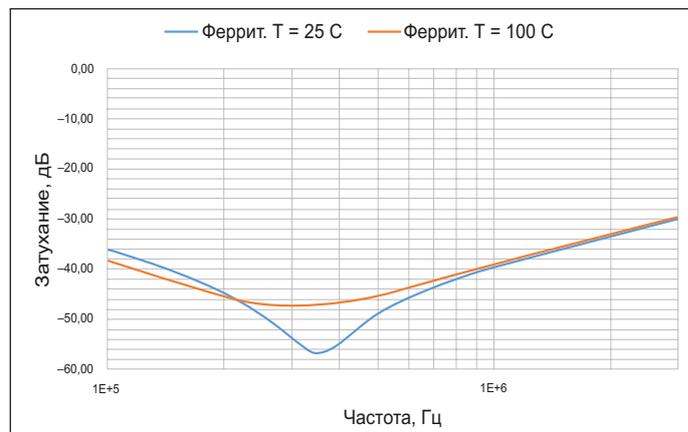


Рис. 8. Изменение затухания ферритового дросселя с нагревом

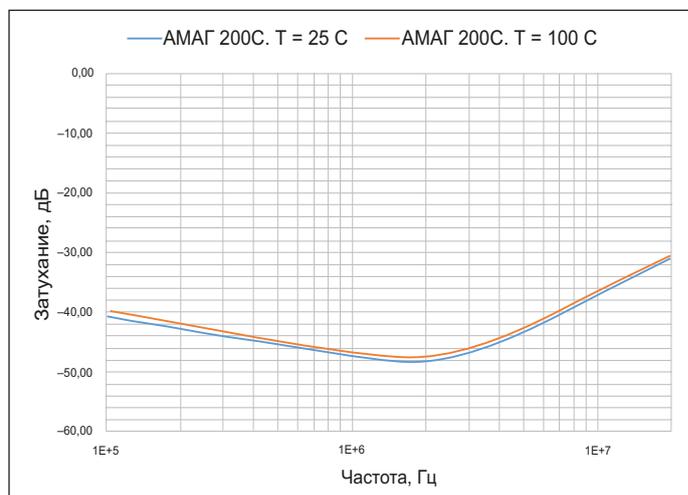


Рис. 9. Изменение затухания дросселя на основе АМАГ 200С с нагревом

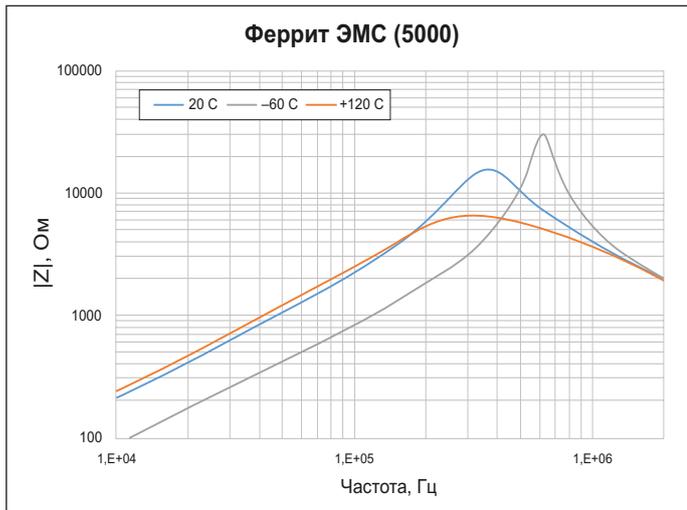


Рис. 10. Частотные характеристики импеданса дросселя на феррите ( $\mu = 5000$ ) при разных температурах

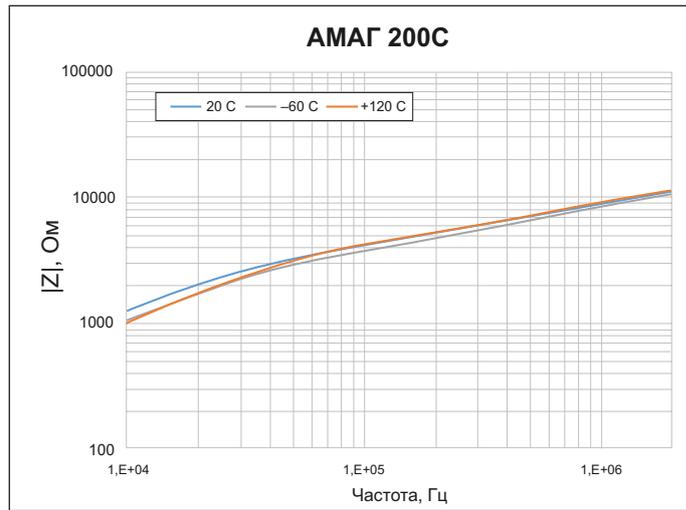


Рис. 11. Частотные характеристики импеданса дросселя на основе АМАГ 200С при разных температурах

- Получение характеристик дросселя, близких к ферритовому дросселю при минимальных размерах и весе. Объем и вес дросселя сокращается в 3–5 раз.
- Компромиссный вариант. Объем и вес дросселя сокращаются в 2–3 раза при характеристиках, значительно превосходящих характеристики ферритового дросселя. Резонансная частота возрастает в 3–5 раз.

Большинство мировых производителей, включая отечественного производителя ПАО «МСТАТОР», выбирают третий вариант, обеспечивающий при меньших размерах и сравнимой цене отличные характеристики синфазного дросселя.

На базе магнитопроводов серии MSFN ПАО «МСТАТОР» выпускает большую серию двух- и трехобмоточных синфазных дросселей ДС2 и ДС3 в горизонтальном и вертикальном исполнении [1].

На рис. 12–13 представлена продукция ПАО «МСТАТОР».

### Выводы

Использование витых кольцевых магнитопроводов из тонкой нанокристаллической ленты в синфазных дросселях имеет целый ряд преимуществ относительно традиционных ферритовых сердечников. К ним относятся:

- Повышение резонансной частоты в 3–5 раз.
- Улучшение затухания в фильтрах.

- Многokратное расширение частотного диапазона как в сторону нижних, так и в сторону верхних частот. Достижимо перекрытие по частоте до 10 000 раз (10 кГц... 100 МГц). В некоторых случаях возможна замена двухзвенного фильтра на основе феррита однозвенным фильтром на базе нанокристаллического сердечника.
- Снижение объема и веса дросселя в 2–3 раза.
- Расширение температурного диапазона ( $-60 \div 155 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- Кратное улучшение температурной стабильности импеданса и затухания дросселя, что дает сохранение полученных характеристик фильтра в широком температурном и частотном диапазонах.
- Пластмассовый контейнер обеспечивает хорошую электрическую изоляцию обмоток и возможность нанесения обмотки толстым проводом.
- Снижение активных потерь в обмотке за счет уменьшения количества витков и применения более толстого провода.
- Импортозамещение. Отечественный производитель, обеспечивающий качество продукции на уровне мировых лидеров. В заключение — ответы на ряд типичных вопросов заказчиков.

1. Почему «МСТАТОР» и другие производители рекомендуют использовать в синфазных дросселях именно нанокристаллические материалы, а не аморфные с высокой проницаемостью?

Действительно, ПАО «МСТАТОР» выпускает серию MSF на базе аморфной ленты АМАГ 170 на основе кобальта. Начальная магнитная проницаемость на относительно низких частотах (до 10 кГц) у этой



Рис. 12. Продукция ПАО «МСТАТОР»

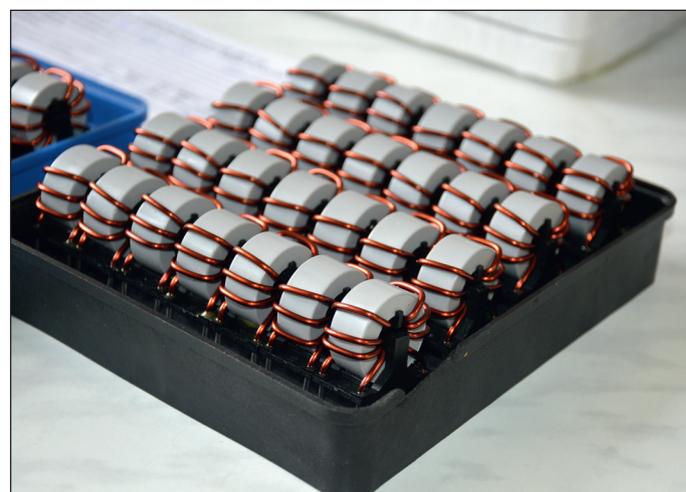


Рис. 13. Продукция ПАО «МСТАТОР»

серии очень высокая (120 000), что выше, чем у серии MSFN. Однако с ростом частоты проницаемость падает гораздо быстрее, чем у серии MSFN, что сужает частотный диапазон сверху. Кроме того, как и все аморфные материалы на основе кобальта, АМАГ 170 имеет невысокую температуру Кюри (200 °С), что ограничивает диапазон частот до 100 °С и значительно снижает температурную стабильность.

2. *Чем отличаются магнитопроводы MSFN и синфазные дроссели ДС2, ДС3, производимые ПАО «МСТАТОР», от продукции других российских и китайских производителей, часто имеющей меньшую цену?*

ПАО «МСТАТОР» много лет работало через своего южнокорейского акционера на зарубежный рынок, серийно поставляя магнитопроводы по спецификации, в которой указывались параметры, не уступающие продукции мировых лидеров. Это потребовало постоянного совершенствования технологии. В настоящее время «МСТАТОР» выпускает самую тонкую ленту в РФ (16–18 мкм) и применяет оптимизированную точную термомагнитную обработку, что обеспечивает более широкий частотный диапазон и минимальные потери. Снижение толщины ленты с 22 мкм до 16–18 мкм обычно дает рост магнитной проницаемости на частоте 100 кГц на 50% и более.

3. *Как правильно подобрать замену импортного дросселя на дроссель от ПАО «МСТАТОР»?*

Сначала следует выяснить — импортный дроссель ферритовый или нанокристаллический. Дроссель подбирается по индуктивности и рабочему току. В наименовании нанокристаллического дросселя индуктивность указывается обычно на частоте 10 кГц, как и для ферритового. Если импортный дроссель нанокристаллический, необходимо подобрать замену с близкой индуктивностью на частоте 10 кГц и заданным рабочим током.

Для замены ферритового дросселя мы рекомендуем подбирать нанокристаллический аналог по индуктивности на частоте 100 кГц. Это

значение указывается в этикетке и в ТУ. Это связано с тем, что индуктивность нанокристаллического дросселя падает с ростом частоты, а у ферритового сохраняется до частот близких к частоте резонанса[7]. Если возникают затруднения при подборе замены, предлагаем обратиться в отдел маркетинга ПАО «МСТАТОР».

Более детальную научную информацию по изложенной теме см. в списке литературы.

## Литература

1. [www.mstator.ru](http://www.mstator.ru). Продукция / Синфазные дроссели/фильтры.
2. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания // М. Горячая линия–Телеком. 2019. 540 с.
3. Cuellar C., Idir N., Benabou A. High Frequency Behavioral Ring Core Inductor Model // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 31. Issue 5 (May). С. 3763–3772.
4. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Эквивалентная схема замещения дросселя, намотанного на феррите, в широком диапазоне частот (0 Гц — 500 МГц) // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24. №4. С. 25–45.
5. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В., Фоченков Э.А. Эквивалентная схема замещения дросселя на нанокристаллическом сердечнике с большой магнитной проницаемостью // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25. № 4. С. 100–121.
6. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. К вопросу использования емкостно-связанных элементов для объяснения взаимного влияния электрических проводов // Радиотехника. 2024. Т. 88. №1. С. 15–30.
7. Смирнов Д.Е., Фоченков Э.А. Синфазные дроссели — тонкости подбора аналогов // ПРИБОРТЕХ ЭКСПО. №17 (август 2022). С. 32.