

Магнитопроводы ПАО «МСТАТОР» в импульсных источниках питания (ИИП)

Доклад Всероссийской научно-практической конференции "["Электропитание-2021"](#) в г. В. Новгород, посвященной 30-летию Ассоциации "Электропитание" – со 2 по 5 июня 2021 г. в Новгородском государственном университете имени Ярослава Мудрого (Россия, г. Великий Новгород, Антоново д.1)

Автор: Фоченков Эдуард Анатольевич, начальник бюро механизации и автоматизации ПАО «МСТАТОР», технический консультант по применению магнитных материалов и расчетам электромагнитных компонентов.

Аннотация: В докладе рассматриваются технические особенности и преимущества магнитомягких материалов и магнитопроводов, выпускаемых ПАО «МСТАТОР» (г. Боровичи) применительно к области импульсных источников питания. Даны рекомендации по выбору оптимальных материалов и магнитопроводов по их назначению в схеме на примере структурной схемы AC/DC многоканального источника питания. Более подробно рассмотрены магнитопроводы для синфазных помехоподавляющих дросселей, их отличительные особенности и проблемы, возникающие при реализации помехоподавляющих дросселей и фильтров ЭМС.



ПАО «МСТАТОР» – одно из ведущих предприятий РФ в области аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов. Предприятие освоило и успешно развивает патентованные наработки ведущего научного центра СССР – Калужского НИИ материалов электронной техники. Выпускает более 20 наименований сплавов в виде тонких лент и законченные электромагнитные компоненты на их основе. Имеет 55 летний опыт производства электромагнитных компонентов. Изделия поставляются на внешний и внутренний (в т.ч. с приемкой 5 и 9) рынок. ПАО «МСТАТОР» обладает уникальными технологиями, позволяющими выпускать самую тонкую (от 16 мкм) ленту в РФ. Широкий размерный ряд тороидальных магнитопроводов от 3 мм до 200 мм по внешнему диаметру. Широкий диапазон по магнитной проницаемости (от 210 до 300 000) и индукции насыщения (от 0.55 до 1.4 Тл). Возможность работы в широком температурном диапазоне от –60 до 300 °С. Продукция

ПАО «МСТАТОР» успешно конкурирует с изделиями ведущих мировых производителей – Vacuumschmelze, Magnetec, Hitachi и др.

Область применения аморфных и нанокристаллических материалов весьма широкая. Ниже приведены рекомендации по выбору магнитопроводов применительно к разработке и производству импульсных источников питания.

Бытует мнение, что современные аморфные и нанокристаллические сплавы постепенно вытеснят ферриты с рынка. На самом деле это мнение ошибочно. Для каждого материала существует своя оптимальная область применения, в которой конкретный материал дает лучший результат. К тому же технические требования к ИИП и условия эксплуатации могут быть различны. По оценкам компании ЛЭПКОС тороидальные магнитопроводы занимают на рынке менее 30%, а это основная форма для аморфных и нанокристаллических материалов. Феррит имеет преимущество низкой цены, поэтому в недорогих устройствах, работающих в узком температурном диапазоне обычно нет смысла использовать другие материалы. В тоже время аморфные и нанокристаллические сплавы имеют ряд уникальных свойств, принципиально недостижимых для феррита. Поэтому правильно будет сказать, что доля аморфных и нанокристаллических материалов растет, и будет расти в дальнейшем в конкретных применениях, там, где эти материалы имеют явное преимущество перед ферритами.

Целью настоящего сообщения является показ потребителям, что именно можно ожидать от применения новых материалов и какие конкретно сплавы целесообразно применять в каждом конкретном случае. Помимо этого, у отечественных производителей на сегодня существует ряд проблем, не позволяющих освоить аналоги лучших импортных ферритов и магнитодиэлектриков. А это создает проблемы с импортозамещением. Продукция ПАО «МСТАТОР» включена в перечень ЭКБ и по своим техническим характеристикам, как правило, не уступает продукции мировых лидеров в области аморфных и нанокристаллических материалов. ПАО «МСТАТОР» поставляет магнитопроводы на внешний рынок с 1993 года, что позволило поднять уровень качества до мировых стандартов.

Так что же дает использование аморфных и нанокристаллических сплавов в ИИП?

Ответ известен только специалистам, которые профессионально углубились в проблему этого вопроса:

- Улучшение функциональных характеристик
- Повышение КПД
- Решение проблем ЭМС
- Расширение температурного диапазона
- Снижение габаритов и массы
- Экологически чистое производство

На Рис.1 представлена упрощенная структурная схема многоканального ИИП. Рассмотрим по ней применение магнитопроводов.

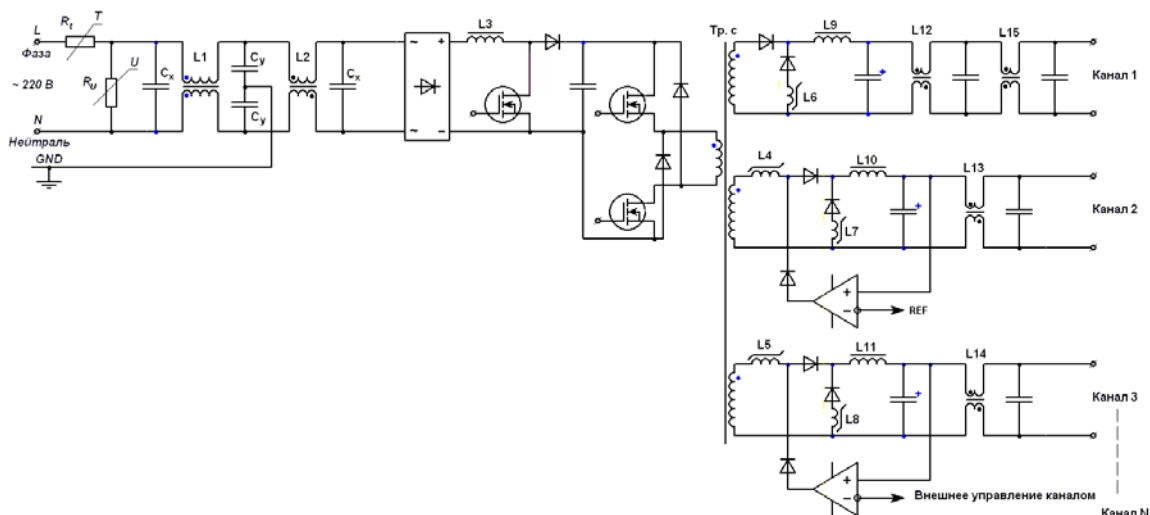


Рис. 1. Упрощенная структурная схема многоканального импульсного источника питания AC/DC

Таблица 1 – Рекомендуемые серии магнитопроводов

Область применения	Материал	Обозначение серии
Синфазный дроссель L1, L15	Нанокристаллический АМАГ 200С	MSFN
Дифференциальный дроссель L2, L12, L14	Аморфный АМАГ 202	MSC
	Нанокристаллический АМАГ 178N	MSCN-TH
	Аморфный прессованный	APH
	Нанокристаллический прессованный	APM
Дроссель коррекции коэффициента мощности L3	Нанокристаллический АМАГ 200С	MSC-NGN
	Нанокристаллический АМАГ 178N	MSCN-TH
	Нанокристаллический прессованный	APM
Силовой трансформатор Tr.c	Нанокристаллический АМАГ 200С	MSTH-TH
	Аморфный АМАГ 186	MST

	Нанокристаллический АМАГ 178N (обратноходовый тр-р)	MSCN-TH
Дроссель магнитного усилителя (магнитный ключ) L4, L5	Аморфный АМАГ 172	MSSA
	Нанокристаллический АМАГ 200	MSSN
Одновитковые помехоподавляющие L6...L8	Аморфный АМАГ 172	MSB
Многовитковые помехоподавляющие L6...L8	Аморфный АМАГ 172	MSK
Выходной дроссель (индуктор) L9...L11	Аморфный АМАГ 202	MSC-NGA
	Нанокристаллический АМАГ 200С	MSC-NGN
	Нанокристаллический АМАГ 178N	MSCN-TH
	Аморфный прессованный	APH
	Нанокристаллический прессованный	APM
Трансформатор тока	Аморфный АМАГ 186	MST
Трансформатор управления силовыми п/п приборами	Нанокристаллический АМАГ 200С Нанокристаллический АМАГ 201	MSTH-TH

1. Синфазные дроссели. L1, L15.

Рекомендуется серия MSFN из нанокристаллического сплава АМАГ 200С на основе железа. Сплав - функциональный аналог материалов NANOPERM (Magnetec), VITROPERM (Vacuumschmelze). Индукция насыщения 1.16 Тл. Температурный диапазон $-60...155^{\circ}\text{C}$. Хорошая температурная стабильность – изменение проницаемости в указанном диапазоне около 15 %.

Аналог для спецтехники включен в перечень ЭКБ – серия КЛ из материала АМАГ 200С по КВШУ.684459.001ТУ.

Магнитопроводы серии MSFN широко применяется в синфазных дросселях серий ДС2 и ДС3.

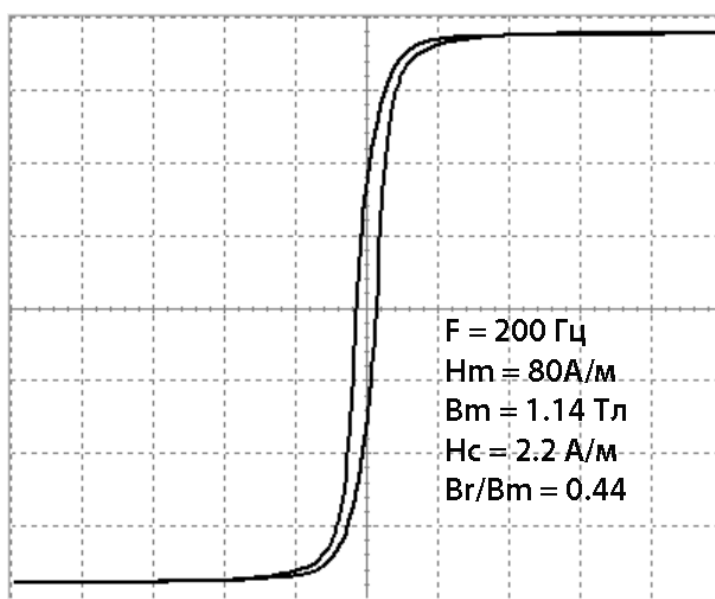


Рис.2. Типовая петля гистерезиса для серии MSFN

Типичная действительная начальная проницаемость (μ') на частоте 1 кГц около 100 000. На частоте 10 кГц – 85 000. На 100 кГц – 26500. На 1 МГц – 4100. Проницаемость монотонно падает во всем диапазоне частот. Отсутствует характерный для ферритов резонанс в районе 2-4 МГц с подъемом проницаемости в 1.5 раза, разворотом фазы и последующим быстрым спадом. Модуль импеданса в одновитковом дросселе непрерывно монотонно растет с ростом частоты (Рис.3). Резонанс на частоте 600 МГц связан с характеристиками измерительной обмотки (длинная линия). При увеличении числа витков и соответственно увеличении длины провода резонанс смещается влево. На основе серии MSFN разработана серия синфазных дросселей для однофазной и трехфазной сети. За счет высокой проницаемости материала дроссели имеют в 4-5 раз меньшее число витков

обмотки относительно аналогов на феррите. Типичная частота резонанса дросселей в районе 1-3 МГц. Для ферритовых аналогов обычно частота резонанса в 4-5 раз ниже. Для широкополосных фильтров ЭМС рекомендуется применять двухзвенные фильтры с небольшим количеством витков.

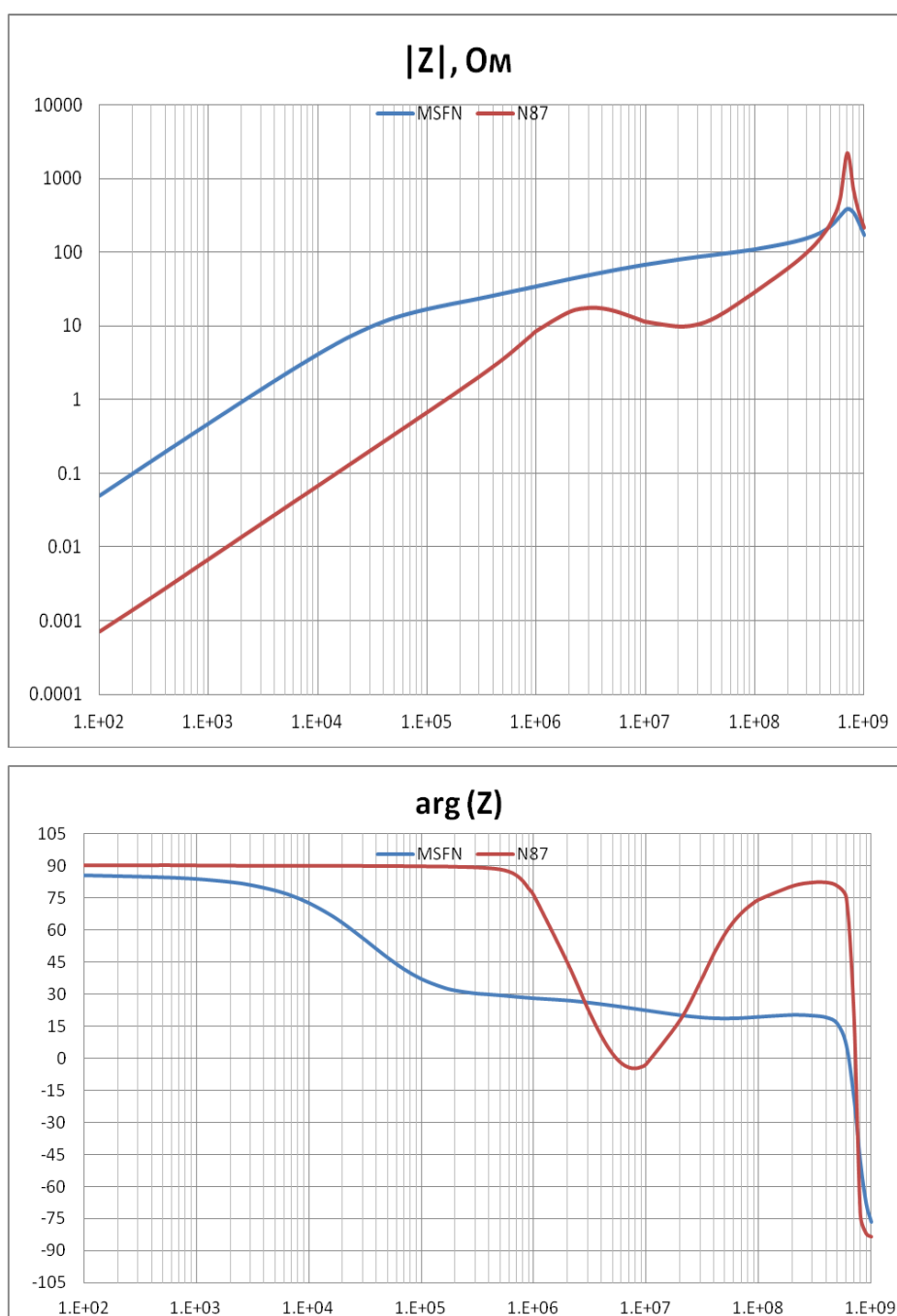


Рис.3. Частотная зависимость модуля и фазы импеданса для серии MSFN в сравнении с ферритом N87 для кольцевого магнитопровода 30-20-10 мм (одновитковая обмотка, $I \times w = 10 \text{ ма} \times \text{вит}$).

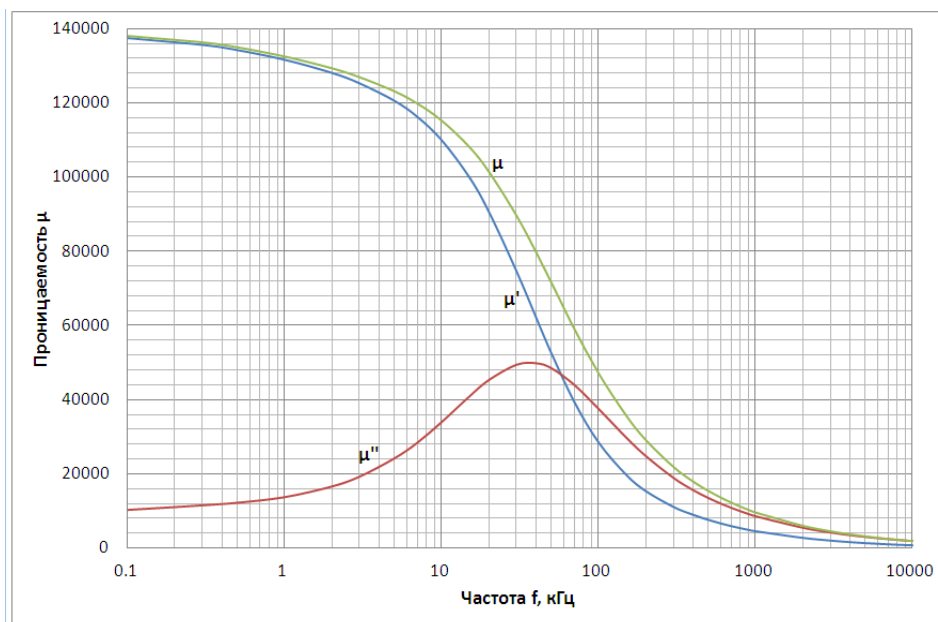


Рис. 4. Зависимость проницаемости от частоты для серии MSFN (кольцо 30-20-10 мм, $I \times w = 10 \text{ мА} \times \text{вит.}$)

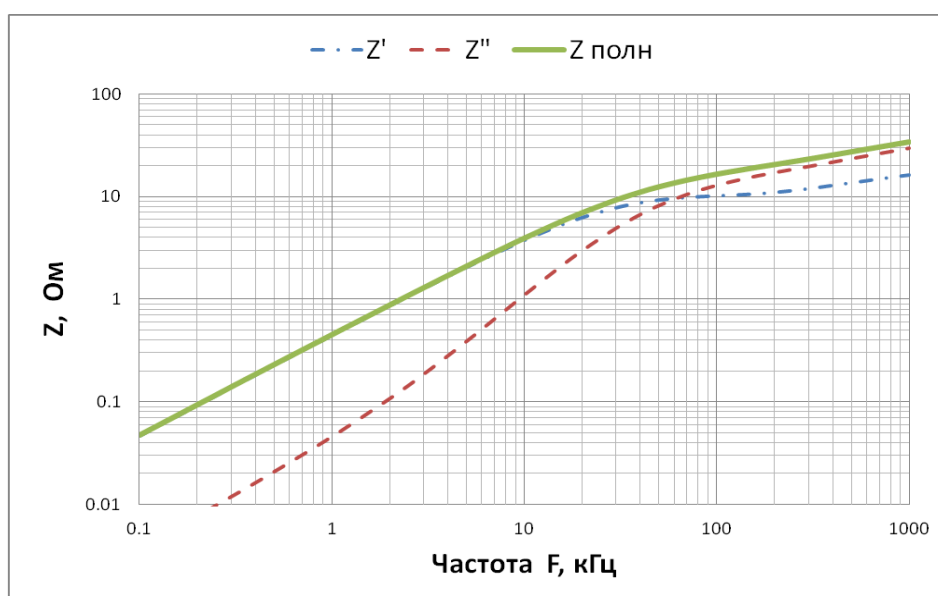


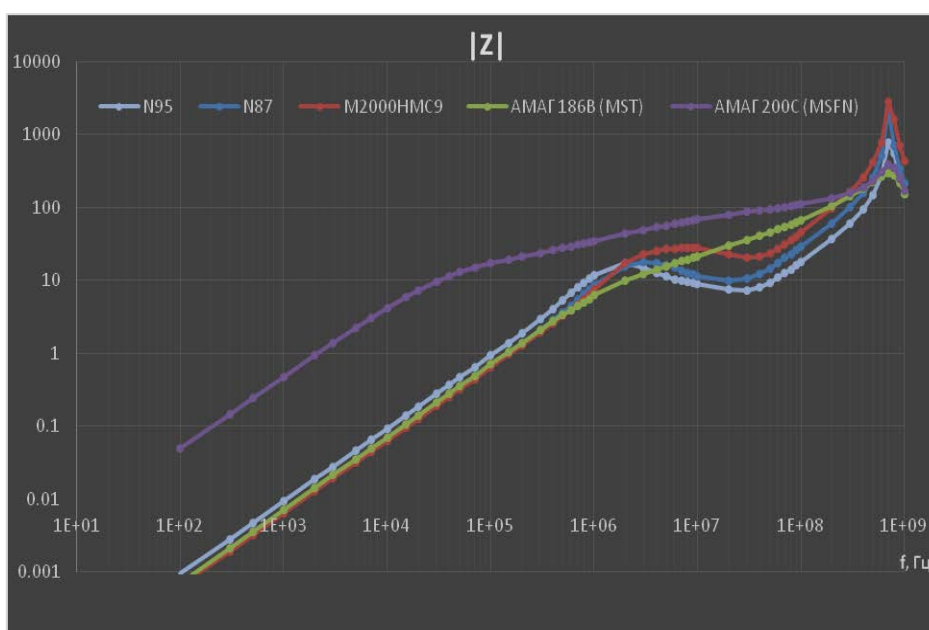
Рис. 5. Зависимость составляющих импеданса от частоты для серии MSFN

Работа синфазного дросселя на основе нанокристаллического материала с высокой проницаемостью принципиально отличается от дросселя на основе феррита. На частотах до 30 кГц преобладает действительная (индуктивная составляющая проницаемости) μ' (Рис.4). На частоте около 50 кГц действительная и мнимая составляющие примерно равны. И далее преобладает мнимая составляющая μ'' ,

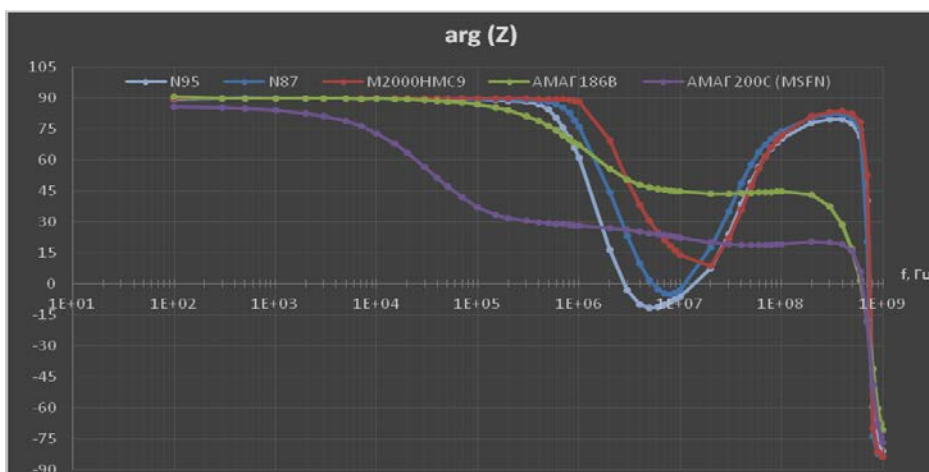
определяемая потерями. Т.е. в высокочастотной области дроссель эффективно поглощает высокочастотные помехи, преобразуя их в тепло.

На Рис.5 представлены частотные зависимости составляющих импеданса. В высокочастотной области импеданс определяется в основном мнимой составляющей Z'' , т.е. сопротивлением потерь.

Мировой лидер в области аморфных и нанокристаллических материалов – немецкая фирма Vacuumschmelze отмечает этот факт [1] как преимущество нанокристаллического материала Vitroperm (функциональный аналог АМАГ 200С) в применении к синфазным помехоподавляющим дросселям. В ВЧ области ферритовый дроссель работает на отражение помехи, а дроссель на основе Vitroperm работает на поглощение.



a)



b)

Рис. 6. Сравнение модуля и фазы импеданса для различных материалов

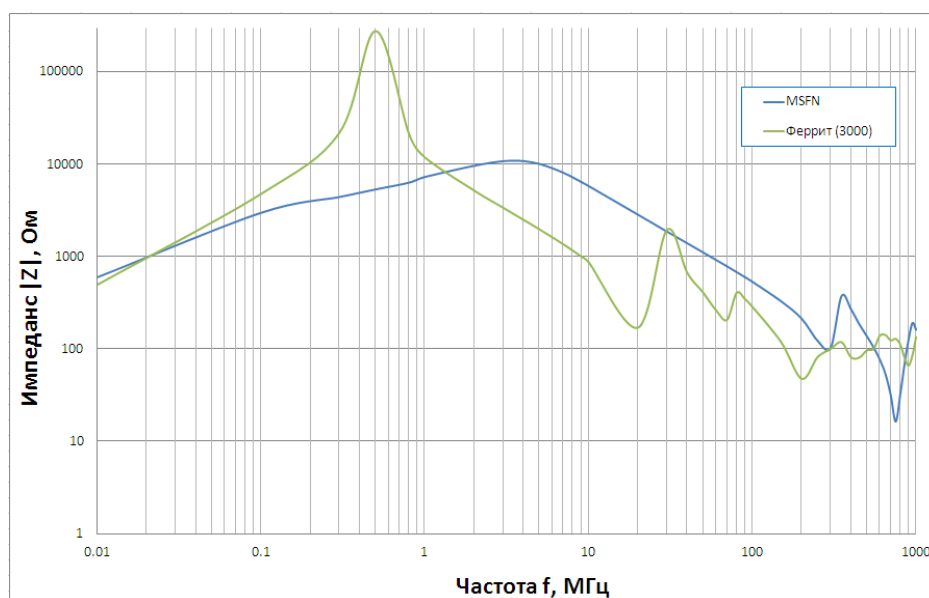


Рис. 7. Зависимость импеданса дросселя 11 мГн от частоты для серии MSFN (12 витков) и феррита (70 витков)

На Рис. 6 представлены частотные зависимости модуля и фазы импеданса дросселей с одновитковой обмоткой на основе различных магнитомягких материалов. Величины модуля импеданса приведены к одному типоразмеру магнитопровода. Для трех марок ферритов N87, N95, M2000HMC9 проявляется характерный резонанс с резким изменением фазы импеданса. При этом индуктивный характер дросселя меняется на емкостной. Для аморфного материала АМАГ 186В ($\mu = 2200$) и нанокристаллического АМАГ 200С (серия MSFN) выраженного резонанса не проявляется. В низкочастотной области, до 30 кГц, дроссель ведет себя как идеальная индуктивность (L – цепь), в высокочастотной как RL цепь с постепенным ростом потерь и снижением индуктивности. Все тестируемые дроссели имели второй выраженный резонанс на одинаковой частоте – 600 МГц. Как оказалось, этот резонанс определен длиной одного витка провода, а не свойствами материала.

На Рис.7 представлена зависимость импеданса от частоты для дросселя с индуктивностью 11 мГн, выполненного на основе серии MSFN, и дросселя 11 мГн аналогичного размера на основе ферритового кольца с проницаемостью 3000. Получилось 12 витков на нанокристаллическом магнитопроводе и 70 витков на феррите. Количество витков на феррите и длина провода в 5.5 раза больше. В таком же соотношении сопротивление обмоток и потери в проводе. Ферритовый дроссель имеет резонанс на частоте 500 кГц, нанокристаллический – на частоте 3 МГц.

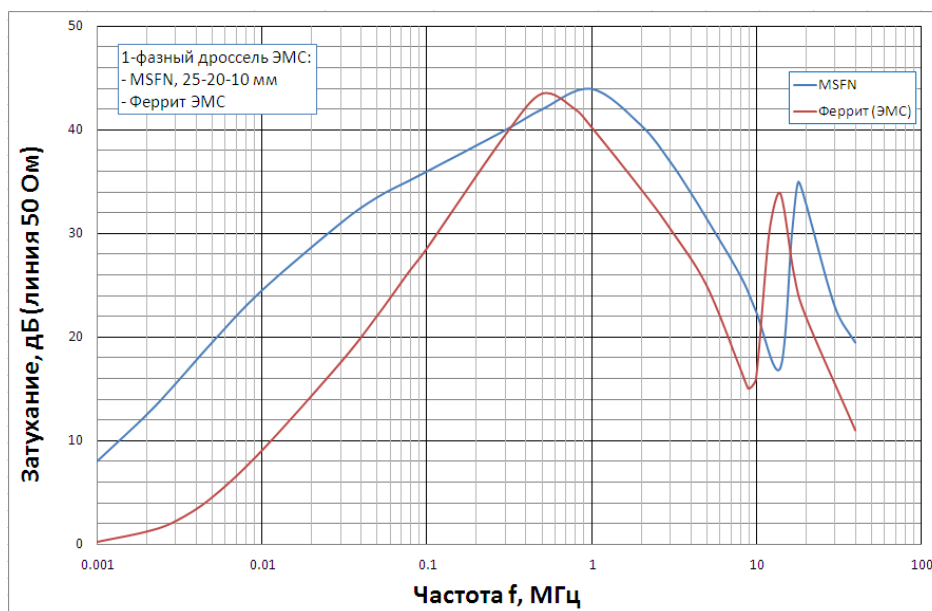


Рис.8. Зависимость затухания от частоты в 50-омной линии (сравнение с ферритом)

На Рис. 8 представлено сравнение характеристик затухания в 50-омной линии для дросселя на основе феррита ЭМС и дросселя на основе магнитопровода MSFN близких габаритов. В НЧ области нанокристаллический дроссель обеспечивает большее затухание за счет высокой проницаемости, а в ВЧ области – за счет малого числа витков и соответственно малой длины провода.

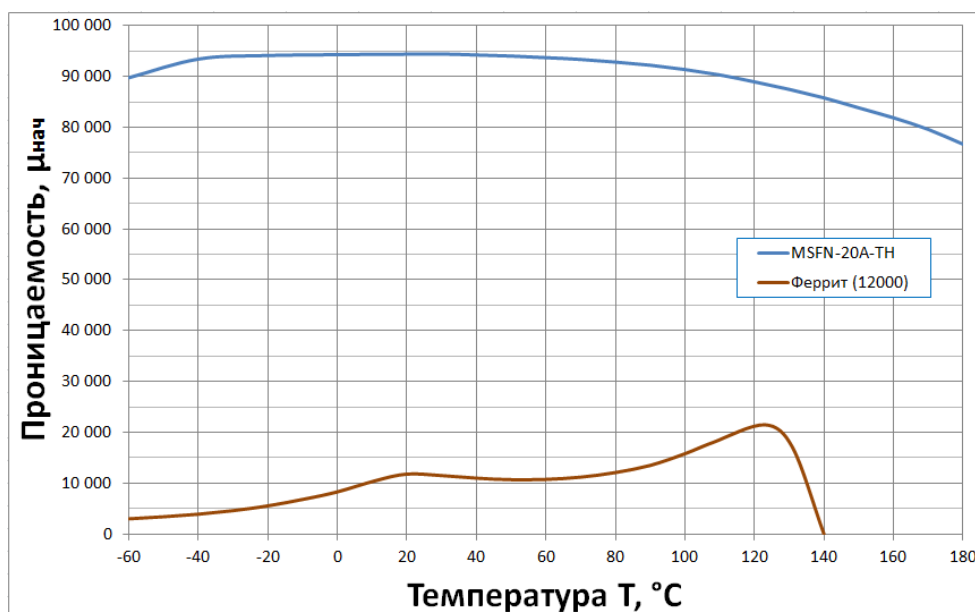
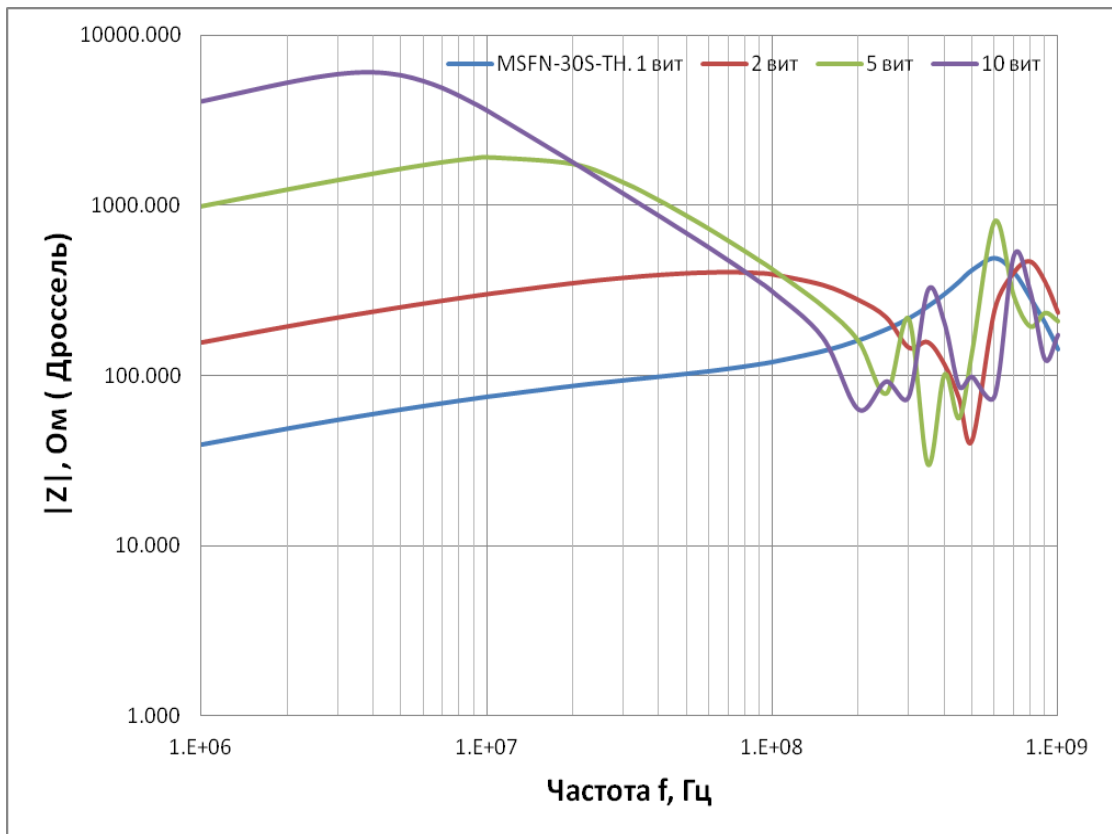
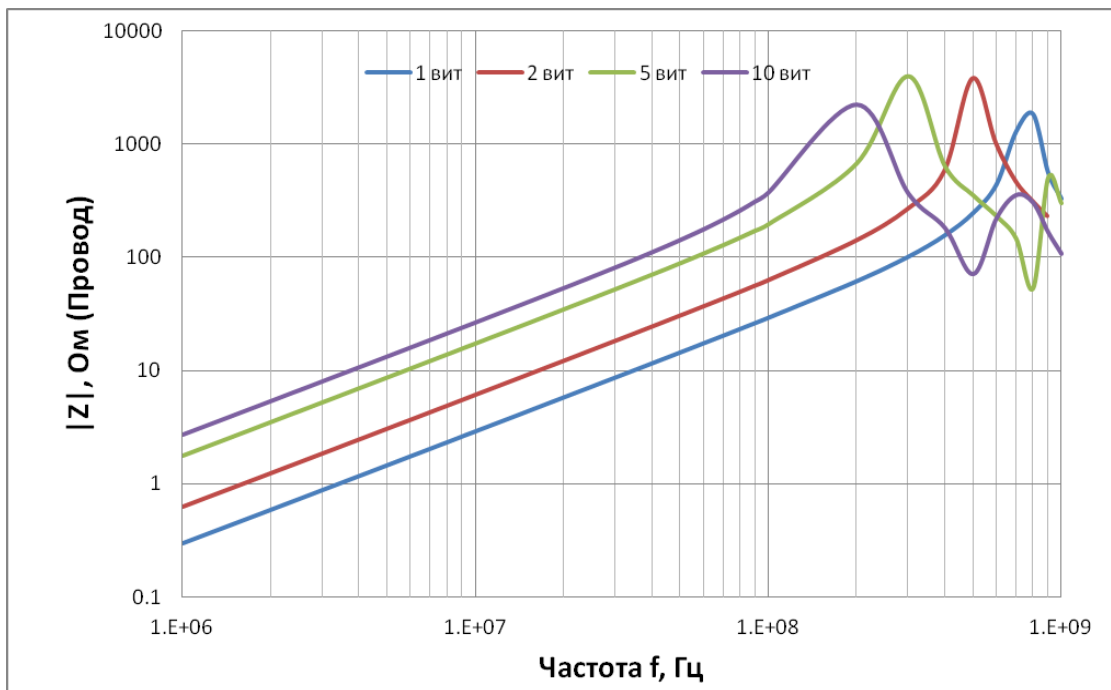


Рис.9. Зависимость проницаемости от температуры

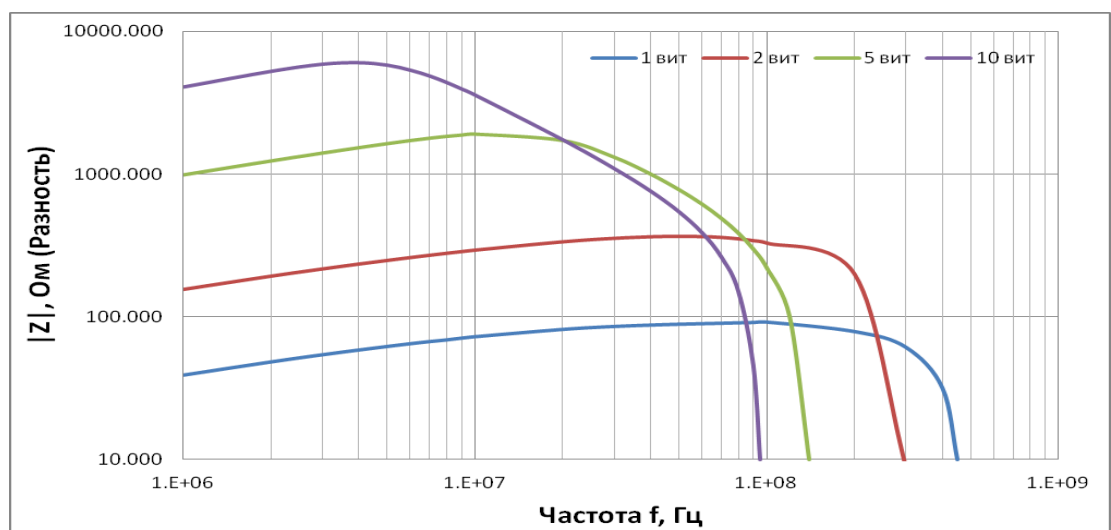
На Рис.9 представлена характерная температурная зависимость для феррита Т46 (данные производителя Epcos) с высокой проницаемостью. Обратите внимание на резкую зависимость проницаемости от температуры. Изменение проницаемости в диапазоне от – 60 до 110 °С в пять раз. При превышении температуры за 120 °С проницаемость резко падает и уже к 140 °С становится равной нулю. На этом же графике приведена аналогичная экспериментальная зависимость для серии MSFN в диапазоне от –60 до 180 °С. В диапазоне –60 °С ÷ 155°С изменение проницаемости всего около 15 %.



а)



в)



с)

Рис. 10. а) – Зависимость модуля импеданса дросселя от числа витков и частоты, в) – импеданс провода, с) – разность импеданса дросселя и провода

На Рис.10 а) показана зависимость импеданса дросселя (MSFN-30S-TH) от числа витков и частоты, на Рис. 10 в) – зависимость импеданса провода от частоты (провод намотан на пустом контейнере без сердечника), на Рис. 10 с) – разность импеданса дросселя и провода. Это не совсем корректно, т.к. не учитывается фаза, но позволяет понять, до каких частот материал сохраняет магнитные свойства. Сравнивая Рис. 10 а) и Рис. 10 в) можно заметить, что второй резонанс определяется самим проводом, в первую очередь его длиной. Причем характеристики отдельного прямого провода и провода,

намотанного на пустой контейнер, отличаются незначительно. Из полученных данных следует, что предельная частота дросселя, на которой работает магнитный материал, зависит от длины провода. В данном случае для 1 витка материал работает до 450 МГц, для двух – до 300 МГц, для пяти – до 140 МГц, для 10 витков – до 95 МГц. Причем выяснилось, что характеристики провода мало зависят от материала провода, диаметра провода, числа витков и расположения их на сердечнике, но очень сильно зависят от длины. Поэтому для высокочастотных фильтров не имеет смысла использовать дроссели с большим количеством витков и большой длиной провода, они не будут работать на частотах в десятки мегагерц. Правильнее использовать два дросселя с небольшим количеством витков последовательно.

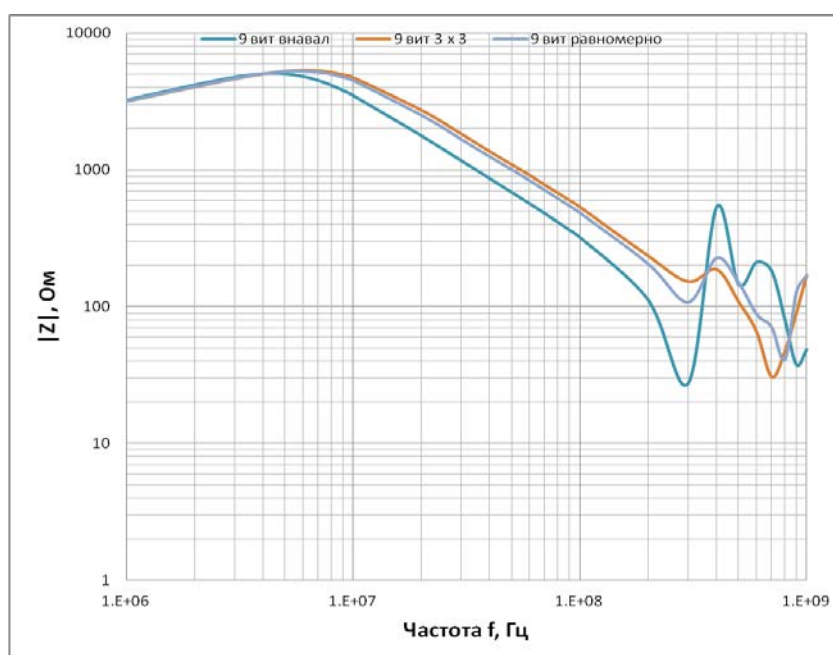


Рис. 11. Влияние способа намотки

На Рис. 11 показано влияние способа намотки. Длина провода и число витков одинаковы. Намотка внавал дает худший результат по величине импеданса, самую низкую частоту первого резонанса и самую большую амплитуду колебания $|Z|$ в точке второго резонанса (300 кГц). Равномерная намотка с разнесением витков по сердечнику дает средний результат. И самый лучший результат – секционная намотка – 3 секции по 3 вит. Минимизация емкости обмотки смещает вправо точку первого резонанса и снижает амплитуду колебания $|Z|$ (снижает добротность) в точке второго резонанса.

Из сказанного следует несколько практических выводов. Для смещения резонанса дросселя вправо и улучшения характеристик подавления помех рационально:

- использовать малогабаритные магнитопроводы с минимальным окном для обмотки;
- использовать тонкие провода, исходя из требования допустимого перегрева;
- использовать тороидальные магнитопроводы с круглым сечением;
- для ленточных магнитопроводов использование магнитопроводов с квадратным сечением лучше, чем с прямоугольным;
- использовать рядовую однослойную обмотку или секционную, по возможности исключить многослойную намотку и намотку внавал;
- использовать тонкую ленту при навивке сердечника;
- использовать материалы с высокой проницаемостью.

2. Дифференциальные дроссели L2, L12, L13, L14.

- Малогабаритная **серия MSC** из недорогого аморфного сплава АМАГ 202 на основе железа. С распределенным зазором, получаемым в результате специального отжига. Типичная проницаемость 245. Максимальное поле смещения постоянным током до 35 Э. Индукция насыщения 1.4 Тл. Миниатюрные магнитопроводы в тонкостенных контейнерах из сплава на основе алюминия. Размерный ряд по внешнему диаметру от 3 до 20 мм.

- **Серия MSCN** из нового нанокристаллического сплава АМАГ 178N. Индукция насыщения 1.05 Тл. Типичная проницаемость 210. Отличные частотные характеристики. Падение проницаемости на частоте 10 МГц (относительно 1 кГц) около 10%. Очень малые потери. Хорошая температурная стабильность.

Максимальное поле смещения постоянным током до 35 Э. Широкий размерный ряд, наружный диаметр от 4 до 46 мм.

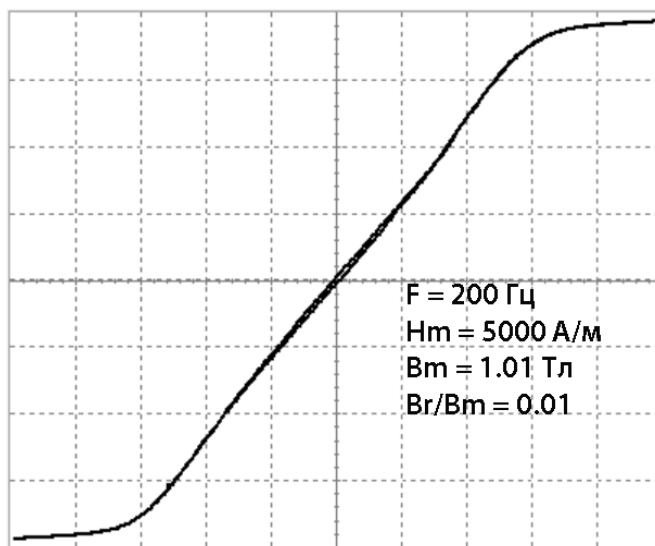


Рис.12. Типовая петля гистерезиса для серии MSCN (АМАГ 178N)

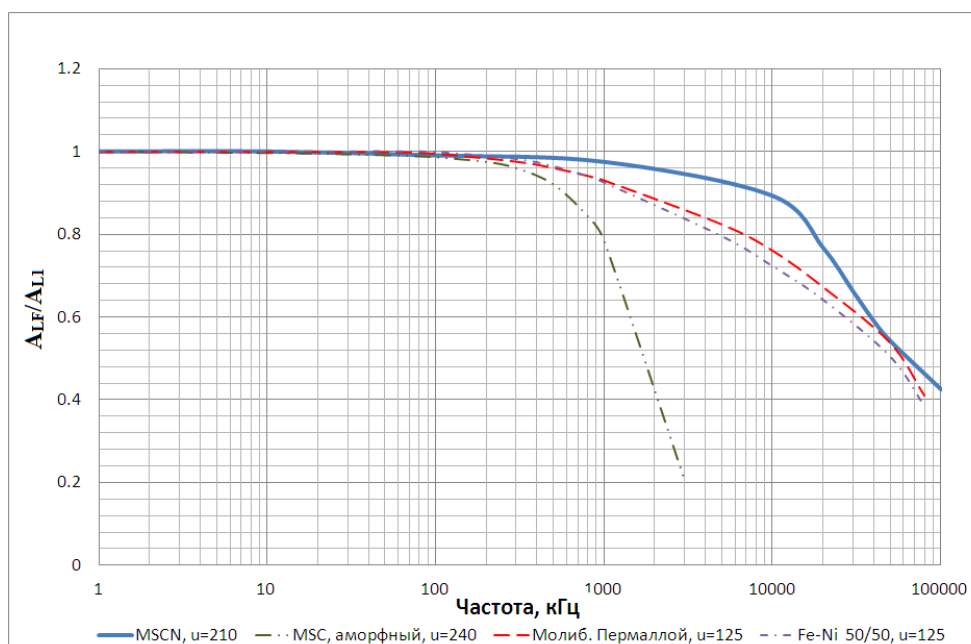


Рис.13. Зависимость индуктивности от частоты для серии MSCN (АМАГ 178N)

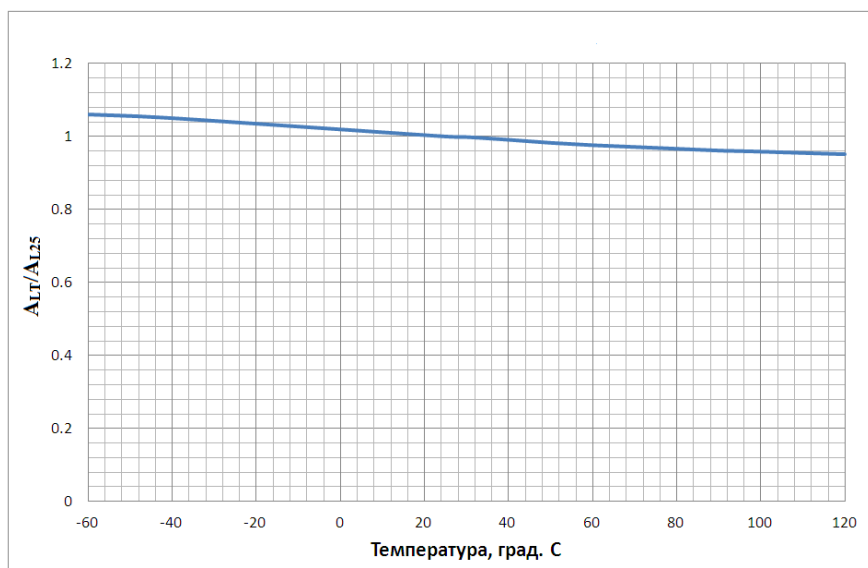


Рис.14. Зависимость индуктивности от температуры для серии MSCN (АМАГ 178N)

- Серия АРН, АРМ.

Недорогие прессованные магнитопроводы (магнитодиэлектрики) из соответственно измельченной аморфной ($B_s = 1.4$ Тл) и нанокристаллической ленты ($B_s = 1.16$ Тл) с покрытием эмалью. Выпускаются акционером завода МСТАТОР – южнокорейской фирмой Amogreentech. ПАО «МСТАТОР» – дистрибьютор в РФ. По потерям лучше известных материалов МП-140, МП-160, High Flux, Kool M μ , МРР. Ряд по проницаемости: 26, 60, 75, 90, 125.

3. Дроссель корректора коэффициента мощности L3.

- **Серия MSC-NGN.** Торoidalные магнитопроводы с немагнитным зазором из нанокристаллического сплава АМАГ 200С с индукцией насыщения 1.16 Тл. Низкие потери. Поле смещения постоянным током до 40 Э.

- **Серия MSCN.** Новый нанокристаллический сплав АМАГ 178N. Очень низкие потери. Примерно на 30% ниже серии MSC-NGN. Индукция насыщения 1.05 Тл. Поле смещения постоянным током до 35 Э.

- **Серия АРН, АРМ.** См. раздел 2 (дифференциальные дроссели).

4. Силовой трансформатор Тр. с.

- **Серия MSTN.** Нанокристаллический материал АМАГ 200С с высокой проницаемостью и минимальными потерями. Улучшенный функциональный аналог известного материала FINEMET. Магнитострикция уменьшена в 4 раза. Специальный отжиг, оптимизированный по минимуму потерь. Индукция насыщения 1.16 Тл. Широкий температурный диапазон от -60 до 155 °С. Падающая зависимость потерь от температуры. При температуре 150 °С потери снижаются примерно на 10% относительно 30 °С. Улучшенная линейность ПГ относительно серии MSFN. Типичная проницаемость μ' на частоте 1 кГц – 65 000, на 100 кГц – 30 000, на 1 МГц – 5000. На Рис.16 показано сравнение потерь с витым ленточным аналогом другого производителя (толщина ленты 25 мкм) и силовым ферритом с проницаемостью 2000. Максимальный выигрыш относительно феррита достигается при работе на средних частотах преобразования (50-100 кГц) с большим размахом индукции. Типичные потери в режиме 100 кГц, 0.3 Тл около 60 Вт/кг, в режиме 50 кГц, 0.6 Тл – 70 Вт/кг.

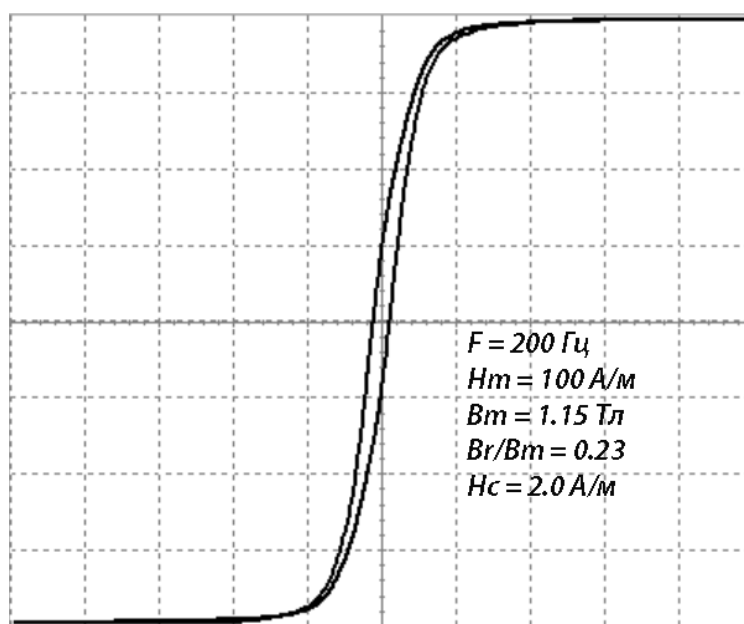


Рис. 15. Типовая петля гистерезиса для серии MSTN (АМАГ 200С)

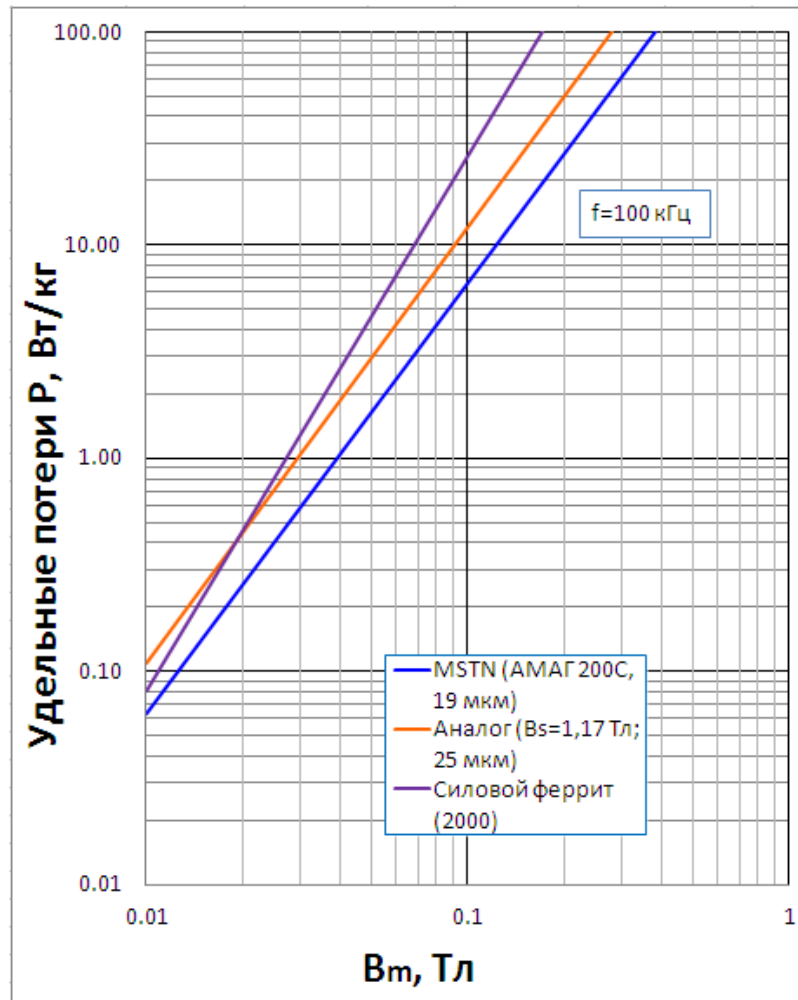


Рис. 16. Сравнение потерь для серии MSTN

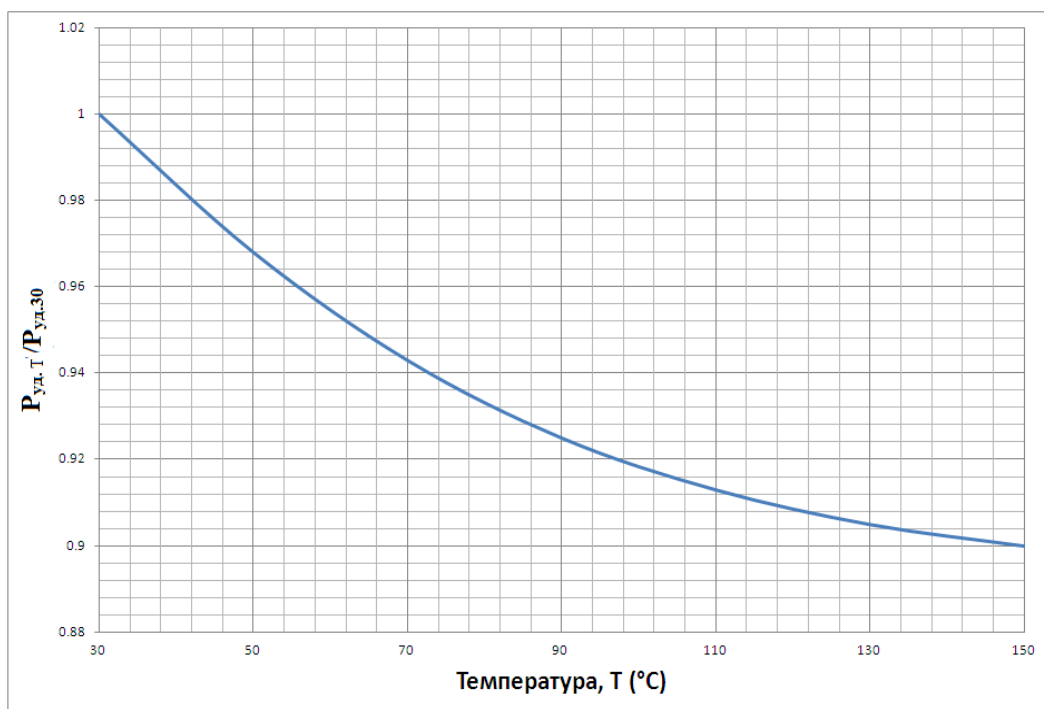


Рис. 17. Зависимость потерь от температуры для серии MSTN

- **Серия MST.** Рекомендуется в тех случаях, когда использование материала с высокой проницаемостью не желательно. Аморфный материал **АМАГ 186А, В, С.** Проницаемость соответственно 3300, 2200, 1400. Индукция насыщения соответственно: 0.85; 0.9; 1.0 Тл. Уникально линейная петля гистерезиса. Используется также в импульсных трансформаторах тока (схемы защиты ИИП по мощности), трансформаторах тока в промышленных сетях питания при наличии тока утечки, в системах телекоммуникации. Магнитострикция насыщения близка к нулевой. Хорошие результаты в повышающих импульсных трансформаторах с «чистыми» короткими фронтами импульсов. Низкие потери, слабая зависимость проницаемости от частоты и амплитуды индукции, используют также в линейных силовых индуктивностях. Как вариант, используется в резонансных схемах.

В фильтрах ЭМС линейные индуктивности с малым разбросом и стабильностью проницаемости позволяют получить хорошее совпадение практических результатов с расчетными и стабильность характеристик фильтров в различных условиях эксплуатации.

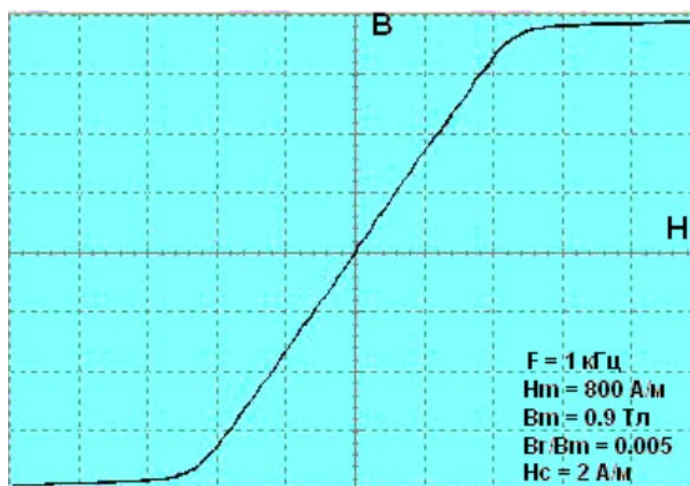


Рис. 18. Типовая петля гистерезиса для серии MST (АМАГ 186)

- **Серия MSCN.** Нанокристаллический материал АМАГ 178N с низкой проницаемостью (210) и минимальными потерями. Хорошая альтернатива ферритам с зазором или магнитодиэлектрикам в обратных преобразователях. За счет отсутствия зазоров имеет преимущество в плане ЭМС. Магнитное поле сконцентрировано внутри сердечника, наружу не выходит. Имеет малые потери при значительном размахе индукции. Индукция насыщения 1.05 Тл. Линейная петля гистерезиса, максимальное поле смещения постоянным током – 35Э, хорошая температурная стабильность. Диапазон температур от – 60 до 155°С. Сам материал допускает работу при экстремально высоких температурах до 250 °С. Типовая ПГ см. Рис.10.

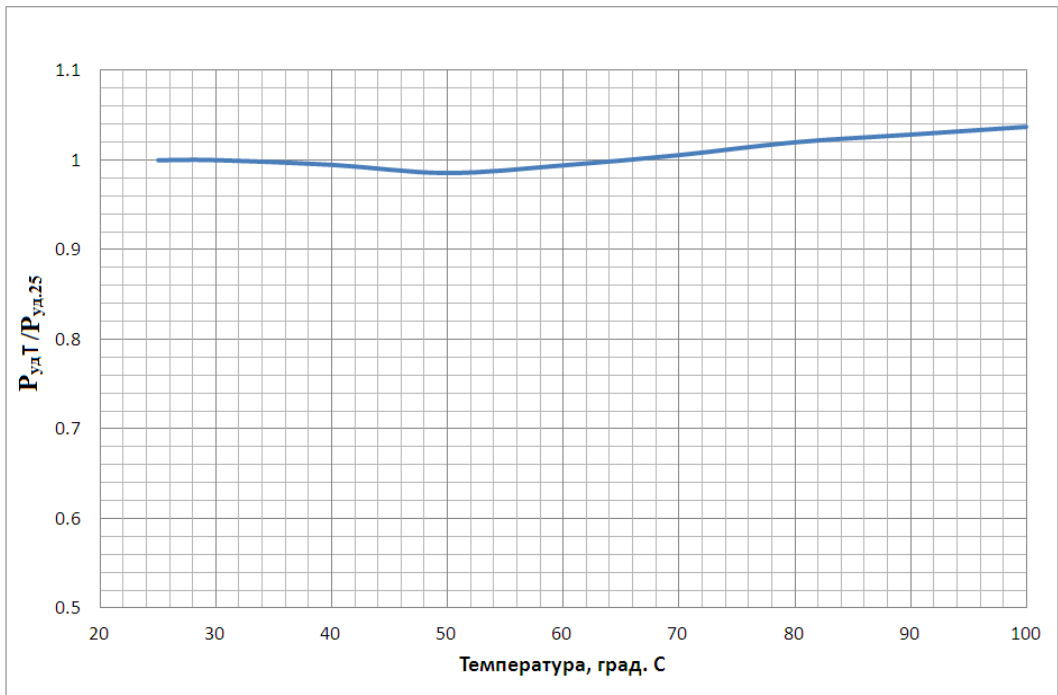


Рис. 19. Серия MSCN. Зависимость потерь от температуры

Сравнение потерь на частоте 100 кГц

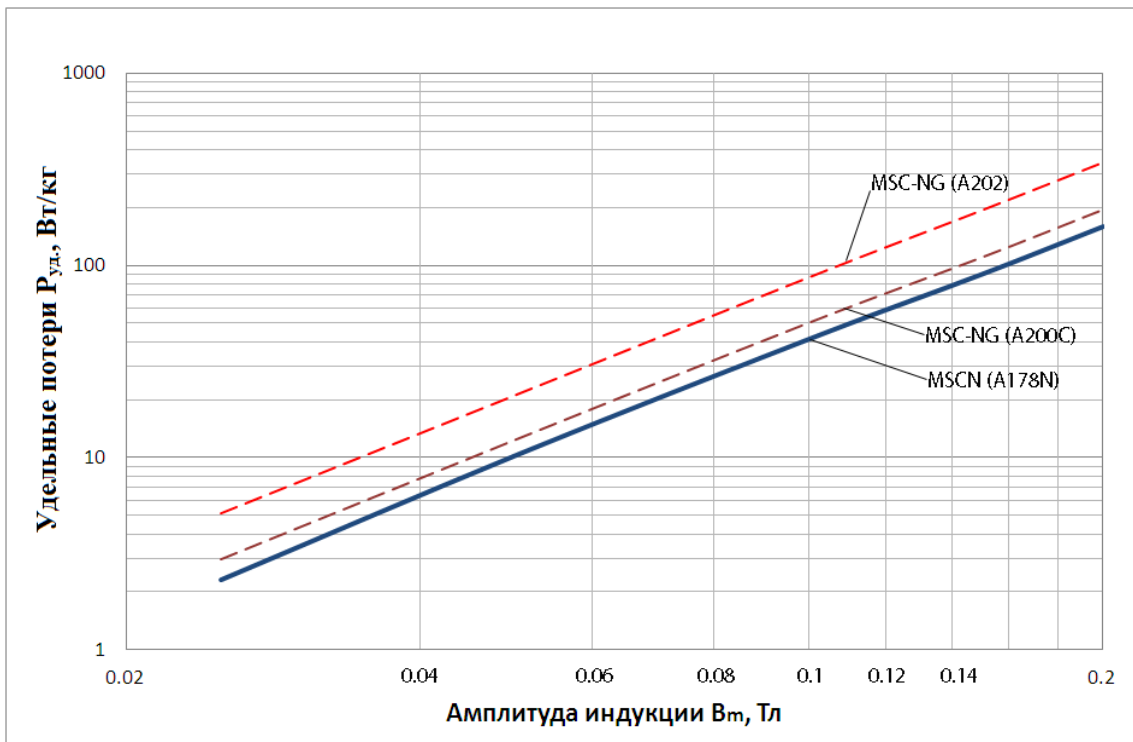


Рис.20. Серия MSCN. Сравнение потерь с разрезными магнитопроводами из АМАГ 202 и АМАГ 200С

5. Дроссель магнитного усилителя L4, L5.

Дроссели магнитных усилителей применяются в многоканальных источниках питания для организации отдельной локальной стабилизации напряжения/тока каждого канала. При этом напряжение в каждом канале становится независимым от нагрузки остальных каналов. Появляется возможность защиты (стабилизации) по выходному току и возможность внешнего независимого управления напряжением каждого канала с помощью внешнего аналогового сигнала. Подробнее [8].

- **Серия MSSA.** Аморфный сплав на основе кобальта АМАГ 172. Индукция 0.6 Тл. Прямоугольная петля гистерезиса с отношением B_r/B_m не менее 0.97 в режиме измерения 100 кГц, 80 А/м. Низкая коэрцитивная сила, менее 17 А/м в режиме измерения 100 кГц, 80 А/м. Низкая коэрцитивная сила обеспечивает малую величину тока управления и низкие потери в цепи управления. Диапазон температур от -60 до 100°C .

- **Серия MSSN.** Нанокристаллический материал АМАГ 200 с отжигом в продольном магнитном поле. Прямоугольная петля гистерезиса с отношением B_r/B_m не менее 0.97 в режиме измерения 100 кГц, 80 А/м. Коэрцитивная сила, менее 25 А/м в режиме измерения 100 кГц, 80 А/м. Высокая индукция насыщения (1.16 Тл) обеспечивает снижение габаритов дросселя. Диапазон температур от -60 до 155°C .

6. Помехоподавляющие магнитопроводы L6, L7, L8.

Эффективно блокируют высокочастотные колебания или выбросы тока. Изменяют характер переключения, делая его «мягким», устраняют причину возникновения помех ЭМС. Альтернатива традиционным RC демпферам, включаемым параллельно силовым диодам. Повышают КПД источника. Используются две серии из аморфного сплава АМАГ 172 на основе кобальта. Подробнее [9].

- **Серия MSB.** Одновитковые миниатюрные дроссели. Одеваются на выводы компонентов. Вывод является обмоткой. Функциональные аналоги ферритовых бусинок, но за счет высокой проницаемости имеют лучшую эффективность.

- **Серия MSK.** (Spike Killers – убийцы выбросов). Многовитковые дроссели. Обмотка представляет собой несколько витков (типично 3-5) толстого провода. Используются там, где необходимо иметь большую величину двойного (полного) потока.

7. Силовые выходные дроссели (индукторы) L9, L10, L11.

- **Серия APH, APM.** Недорогие порошковые прессованные магнитопроводы на основе измельченной аморфной (серия APH) и нанокристаллической (серия APM) ленты. Индукция насыщения соответственно 1.5; 1.2 Тл. Проницаемость из ряда 26, 60, 75, 90, 125. Высокая предельная величина смещения постоянным током (ток нагрузки). Низкие потери. Выпускаются акционером завода МСТАТОР (Amogreentech). ПАО «МСТАТОР» – дистрибьютор по РФ.

- **Серия MSC-NGA.** Серия с немагнитным зазором. Аморфный сплав АМАГ 202 на основе железа, аналог известного 2НСР. Индукция насыщения 1.4 Тл. Средние потери, но высокая предельная величина смещения постоянным током (до 60 Э, в зависимости от проницаемости).

- **Серия MSC-NGN.** Серия с немагнитным зазором. Нанокристаллический сплав АМАГ 200С на основе железа. Индукция 1.16 Тл. Низкие потери, ниже серии MSC-NGA, предельная величина смещения постоянным током до 40 Э.

- **Серия MSC.** Миниатюрные магнитопроводы из недорогого аморфного сплава АМАГ 202 на основе железа. С распределенным зазором, получаемым в результате специального отжига. Типичная проницаемость 245. Максимальное поле смещения постоянным током до 35 Э. Индукция насыщения 1.4 Тл. Миниатюрные магнитопроводы в тонкостенных контейнерах из сплава на основе алюминия. Размерный ряд по внешнему диаметру от 3 до 20 мм.

- **Серия MSCN.** Новый нанокристаллический сплав АМАГ 178N. Индукция насыщения 1.05 Тл. Типичная проницаемость 210. Очень малые потери. Хорошая температурная стабильность. Максимальное поле смещения постоянным током до 35 Э. Широкий размерный ряд, наружный диаметр от 4 до 46 мм.

На корпоративном сайте ПАО «МСТАТОР» в разделе [«Дизайн-центр»](#) имеется комплект программ-калькуляторов для быстрого расчета электромагнитных компонентов по заданным характеристикам [10]. В частности, это ПО позволяет быстро оценить какая серия магнитопроводов лучшим образом подходит под конкретную задачу пользователя.

В исходных данных можно поочередно задавать каждую серию магнитопроводов из списка, производить расчет и затем выбрать оптимальный вариант.

Литература

1. VACUUMSCHMELZE. EMC products based on nanocrystalline VITROPERM // Edition 2016. www.vacuumschmelze.com
2. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания // Горячая линия – Телеком, 2019.
3. Cuellar C., Idir N., Benabou A. High Frequency Behavioral Ring Core Inductor Model // IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 31, Issue: 5, May 2016. С. 3763 – 3772.
4. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов // Екатеринбург: Изд-во Уральского ин-та, 2002. 384 с.
5. Michael E. McHenry, Matthew A. Willard, David E. Laughlin. Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets // Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213, USA Received 30 November 1998.
6. Стародубцев Ю.Н. Магнитомягкие материалы. Энциклопедический словарь-справочник // Техносфера, 2011. – 664 с.
7. Дмитриков В.Ф., Петроченко А.Ю., Исаев В.М., Шушпанов Д.В. Особенности проектирования сетевых фильтров радиопомех в широком диапазоне частот с учетом эквивалентного сопротивления конденсаторов и дросселей // <https://mstator.ru/ru/publications>
8. Э.А. Фоченков. Применение аморфных магнитопроводов насыщения серии MSSA в многоканальных импульсных источниках питания // <https://mstator.ru/ru/publications>
9. Фоченков Э.А. Применение малогабаритных помехоподавляющих магнитопроводов из аморфных металлических сплавов // <https://mstator.ru/ru/publications>
10. Фоченков Э.А. Аморфные и нанокристаллические сплавы в импульсных источниках питания. Программы расчета моточных компонентов // <https://mstator.ru/ru/publications>