Управление магнитным потоком в индукционных системах

Confidential and Proprietary Information of Fluxtrol, Inc. Auburn Hills, MI

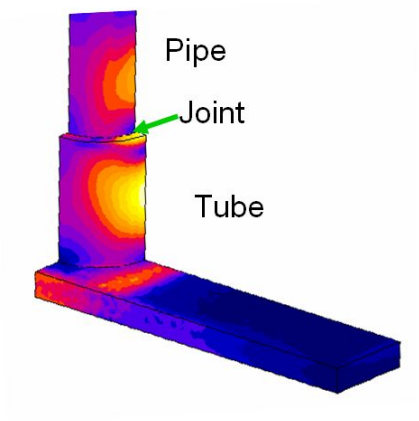
Что такое управление магнитным потоком?

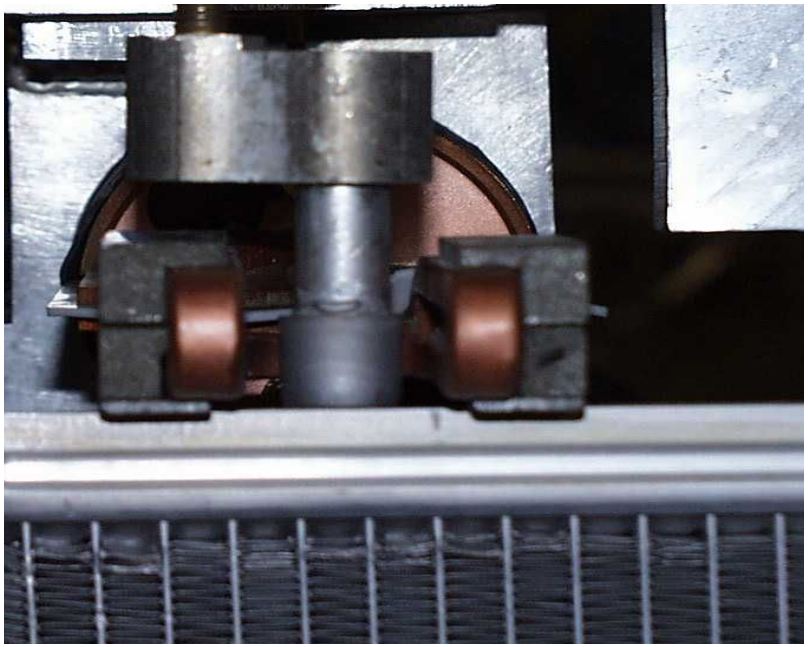
- В рассматриваемом курсе термин “Управление магнитным потоком “ характеризует изменение магнитного потока индуктора с помощью магнитных темплетов (магнитных контроллеров). Управление магнитным потоком с помощью немагнитных тел (Кольца Фарадея) не рассматриваются
- Управление магнитным потоком с помощью немагнитных тел (Кольца Фарадея) приводят к ухудшению параметров индуктора; в данном курсе они не рассматриваются отдельно, а лишь в сочетании с магнитными контроллерами
- Магнитные контроллеры могут существенно менять контур нагреваемого слоя и параметры индуктора; их применение должно рассматриваться при проектировании всей индукционной системы
- В соответствии с различной ролью, выполняемой Контроллерами, (концентрация магнитного потока, экранирование, перераспределение) они могут называться по разному - Концентраторы, Сердечники, Экраны, Импедеры
- Во многих случаях контроллеры выполняют несколько функций одновременно

Комбинация нескольких эффектов магнитного контроллера

Оптимальное распределение мощности между компонентами системы

Программа Flux 3D





Деталь: Алюминиевый теплообменник
Операция: Припайка трубок
Эффекты от использования контроллера:

- Оптимальное распределение мощности между трубками (качество!)
- Экранирование головки теплообменника
- Повышение эффективности нагрева со снижением времени нагрева с 25 до 15 сек
- Использование различных концентраторов Fluxtrol позволяет использовать один и тот же индуктор для пайки ряда различных размеров трубок

Возможные эффекты от использования контроллеров

- Упрравление контуром нагрева
- Экономия электроэнергии или повышение производительности благодаря более высокой эффективности индуктора и лучшему использованию мощности в нагреваемом изделии
- Более низкие величины токов при той же мощности
- Продление срока жизни индуктора
- Улучшение работы генератора благодаря повышению коэффициента мощности индуктора и снижению тока в цепи питания
- Экранирование компонентов индукционной системы от нежелательного нагрева
- Снижение или полное устранение внешнего магнитного поля (проблемы безопасности и электромагнитной совместимости)

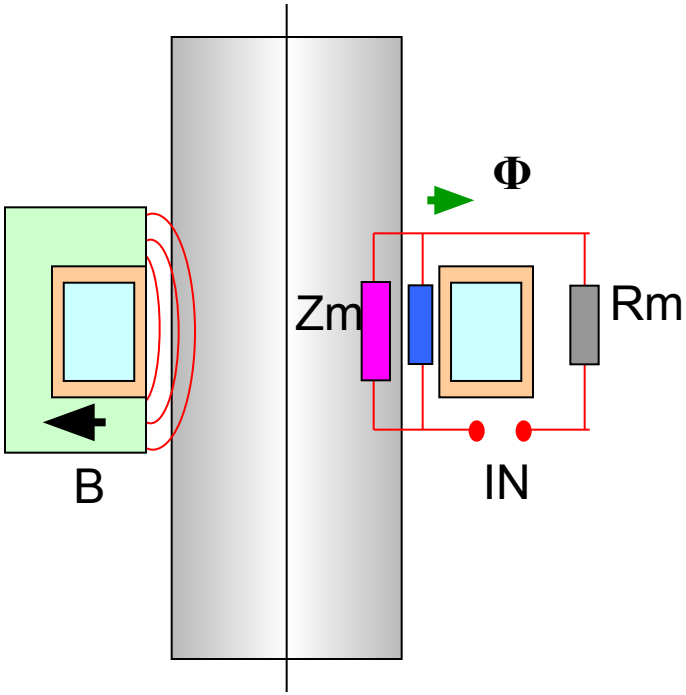
Эффекты от использования контроллеров в наружных индукторах

Роль магнитных контроллеров может быть исследована при рассмотрении магнитных цепей по аналогии с электрическими цепями

$$\Phi = IN / (Zm + Rm)$$

- Φ – Магнитный поток, вызывающий нагрев
- IN – Ампервитки индуктора (движущая сила магнитного потока)
- Zm – Магнитное сопротивление “активной зоны”
- Rm – Магнитное сопротивление потока на **пути обратного замыкания (Return path)**
- B – Плотность магнитного потока (Индукция). Она определяет магнитную нагрузку контроллера

Используя контроллер, мы снижаем Rm и, таким образом, увеличиваем магнитный поток при том же токе индуктора или снижаем потребность в токе при том же магнитном потоке и полезной мощности нагрева. Эффект от применения контроллеров тем выше, чем больше Rm по сравнению с Zm



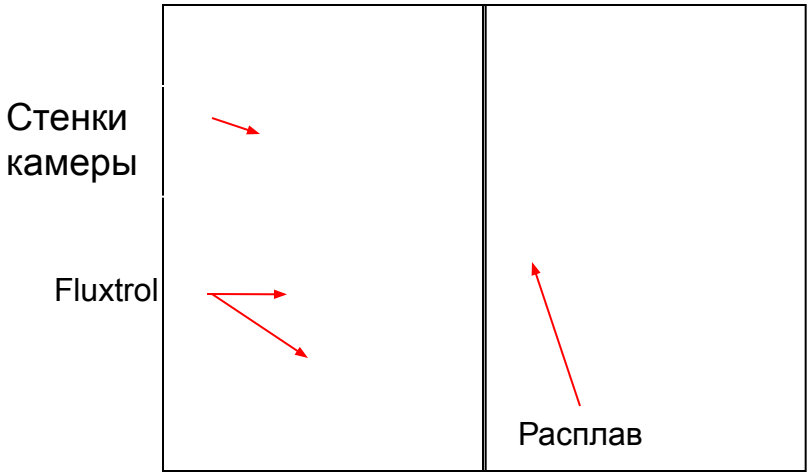
Эскиз и магнитная схема замещения по методу Полного Потока (Total Flux Method)

Индуктор для плавки радиоактивных материалов

Пример эффекта экранирования и повышения эффективности при плавке радиоактивных материалов в защитной камере (Glove box)

Пластины из Fluxtrol A, экранирующие индуктор по бокам и снизу, позволяют:

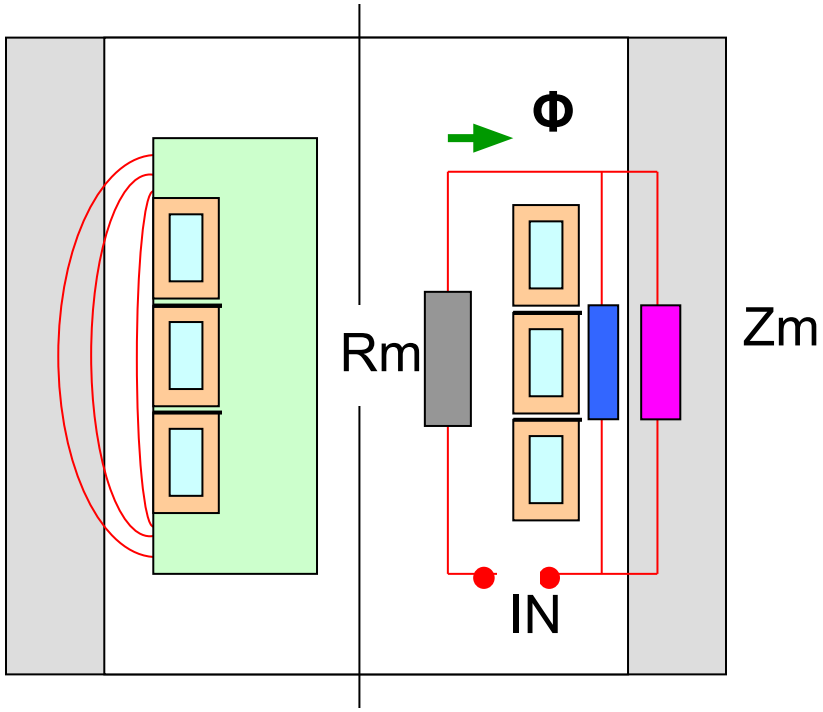
- Существенно снизить потери в стенках и дне камеры
- Увеличить объем и мощность печи при плавке в той же камере
- Повысить эффективность индуктора с 23 до 63% благодаря снижению потерь в стенках и дне камеры и повышению КПД индуктора



Линии магнитного поля и цветовая карта плотности мощности в экранированном индукторе

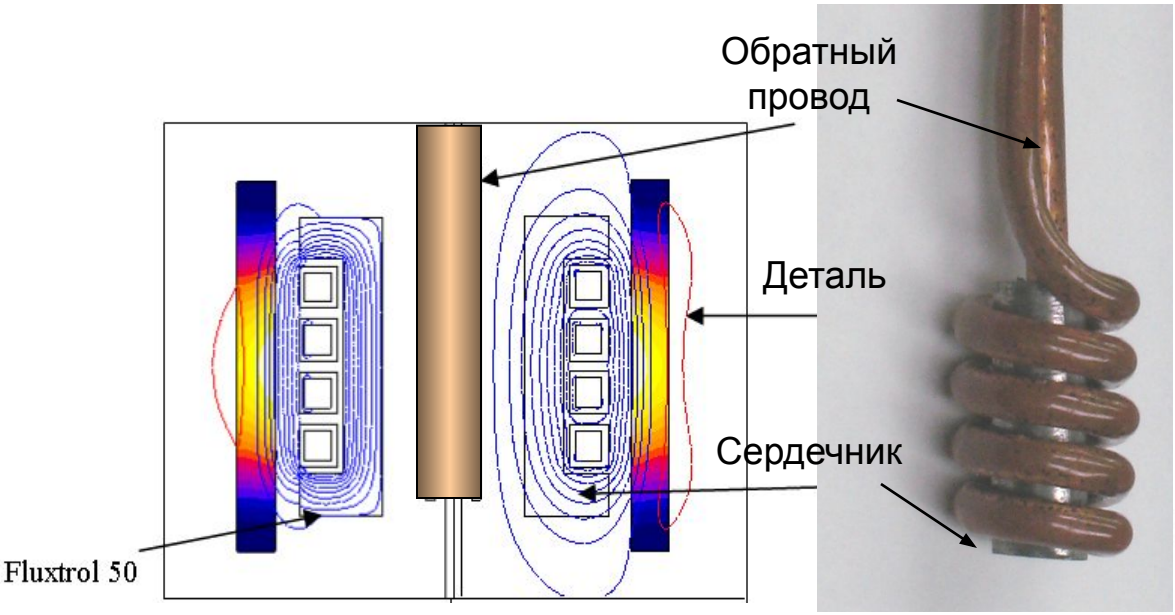
Эффекты магнитных контроллеров во внутренних индукторах

- Во внутренних индукторах магнитный поток должен возвращаться вокруг витков в узком пространстве внутри индуктора, поэтому магнитное сопротивление Rm обычно высоко
- Концентратор (сердечник) значительно снижает ток в индукторе, необходимый для продвижения обратного потока
- При использовании магнитного сердечника, магнитный поток и мощность много выше при том же токе индуктора или потребляемый ток значительно ниже при той же мощности



Эскиз внутреннего индуктора и магнитная схема замещения по методу Полного Потока (Total Flux Method)

Пример влияния сердечника на параметры внутреннего индуктора



Программы Flux 2D и Elta

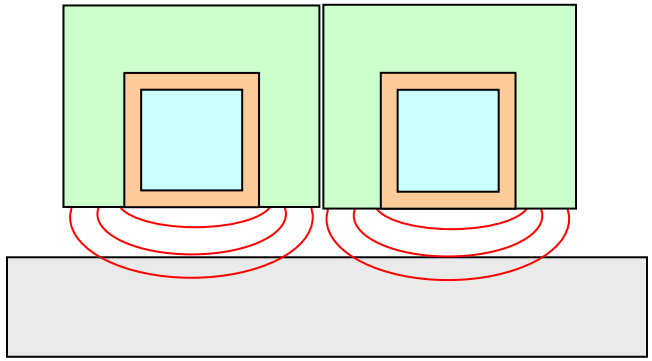
При той же мощности в детали, использование сердечника снижает ток в индукторе с 2000 А до 900 А и, соответственно, реактивную мощность с 65.8 до 30.2 кВА

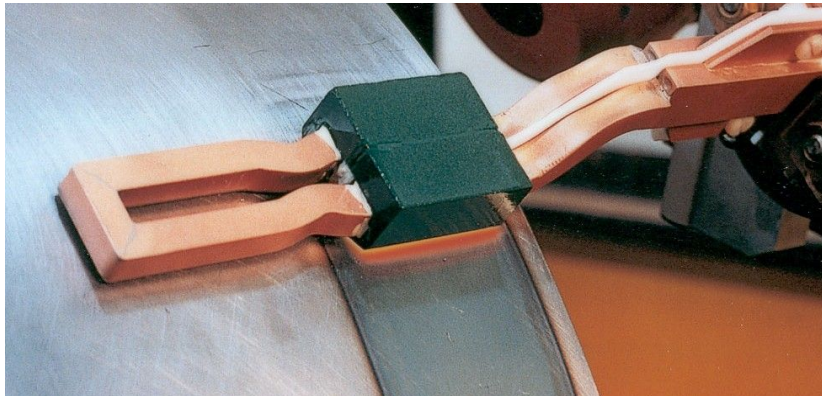
Электрический к.п.д. индуктора повышаетсяс 69% до 84%

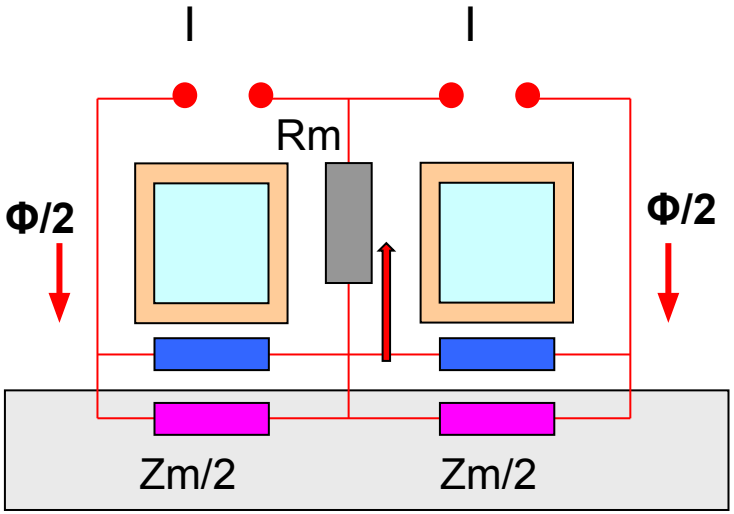
Напряжение на головке индуктора остается практически постоянным (5% роста)

Эффекты магнитных контроллеров в петлевых индукторах

- Магнитное сопротивление обратного провода определяется в основном ограниченным пространством между токоподводами
- Наиболее важен центральный полюс; роль боковых меньше, хотя они тоже способствуют снижению тока
- Приложение магнитного контроллера к части индуктора позволяет контролировать распределение мощности в детали вдоль индуктора







Материалы для магнитных контроллеров

Существующие материалы принадлежат к трем основным группам:

- Магнетодиэлектрики (МД)
- Шихтованное железо
- Ферриты

- Магнетодиэлектрики или Мягкомагнитные Композиты выполняются из магнитных частиц и различных связок. Использование частиц различных материалов и размеров, разных типов связок и технологий производства материала дает возможность получения МД с широким диапазоном свойств
- Шихтованное железо представляет собой тонкие пластины специальной электротехнической стали, изолированные между собой
- Ферриты- это стеклообразный материал, сделанный из окислов железа, магния, цинка или других элементов

Fluxtrol Inc. производит 3 основных МД материала:

- **Fluxtrol A**
- **Fluxtrol 50**
- **Ferrotron 559 H**

Магнитная проницаемость

- Магнитная проницаемость материалов при использовании их в разных условиях (температура, напряженность магнитного поля) может вариироваться в широком диапазоне от 1 до нескольких тысяч
- Магнитная проницаемость - основной параметр характеризирующий эффект, производимый контроллерами. **Однако, исследования произведенные Fluxtrol Inc., показывают, что магнитной проницаемости до 100 достаточно для большинства индукционных устройств**
- Материалы с низким насыщением (ферриты) не имеют высокой проницаемости при высоких магнитных нагрузках
- Высокая магнитная проницаемость обычно находится в противоречии с другими параметрами, такими как электрическое сопротивление и высокие механические свойства
- Влияние магнитной проницаемости на работу контроллера может быть предсказано с помощью компьютерного моделирования

Влияния магнитной проницаемости на параметры процесса

Деталь:

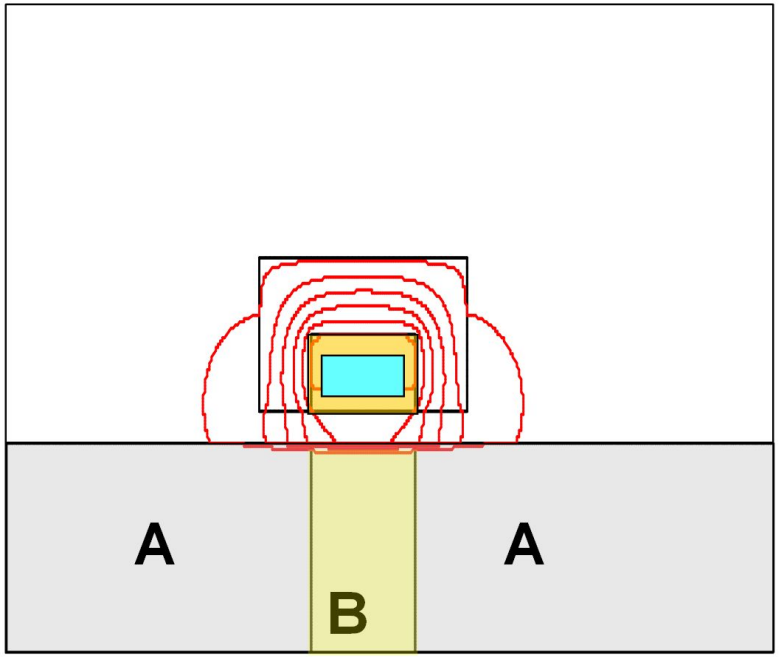
- Плоское тело с центральной частью B (под проводом индуктора) и боковыми частями A
- Материал – магнитная или немагнитная сталь

Условия:

- Линейный одновитковый индуктор
- Одинаковая температура под индуктором
- Одно и то же время нагрева

Параметры:

1. Ток
2. Мощность

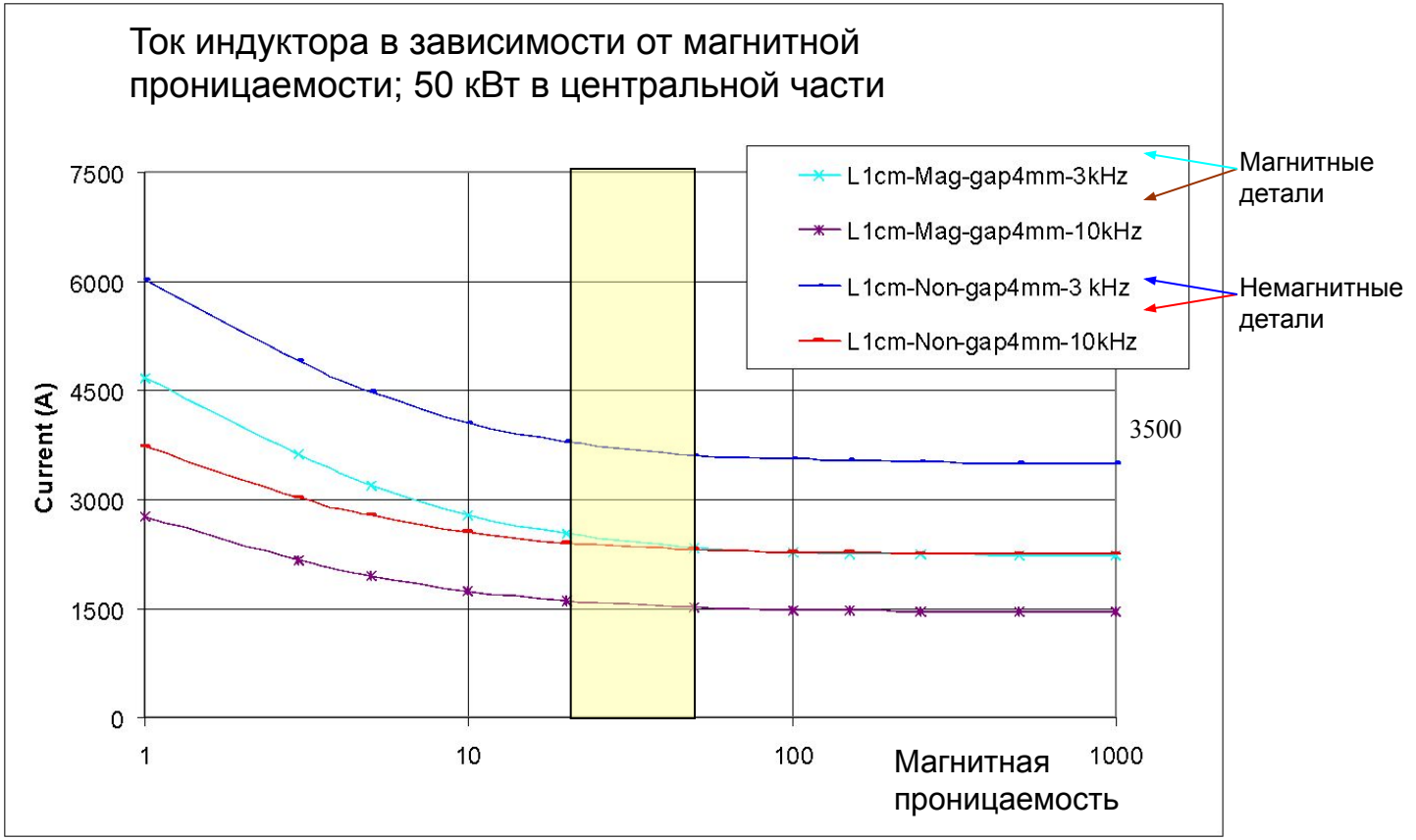


A – боковые зоны, **B** – рабочая зона

Зазор 4 мм; Ширина индуктора 19 мм

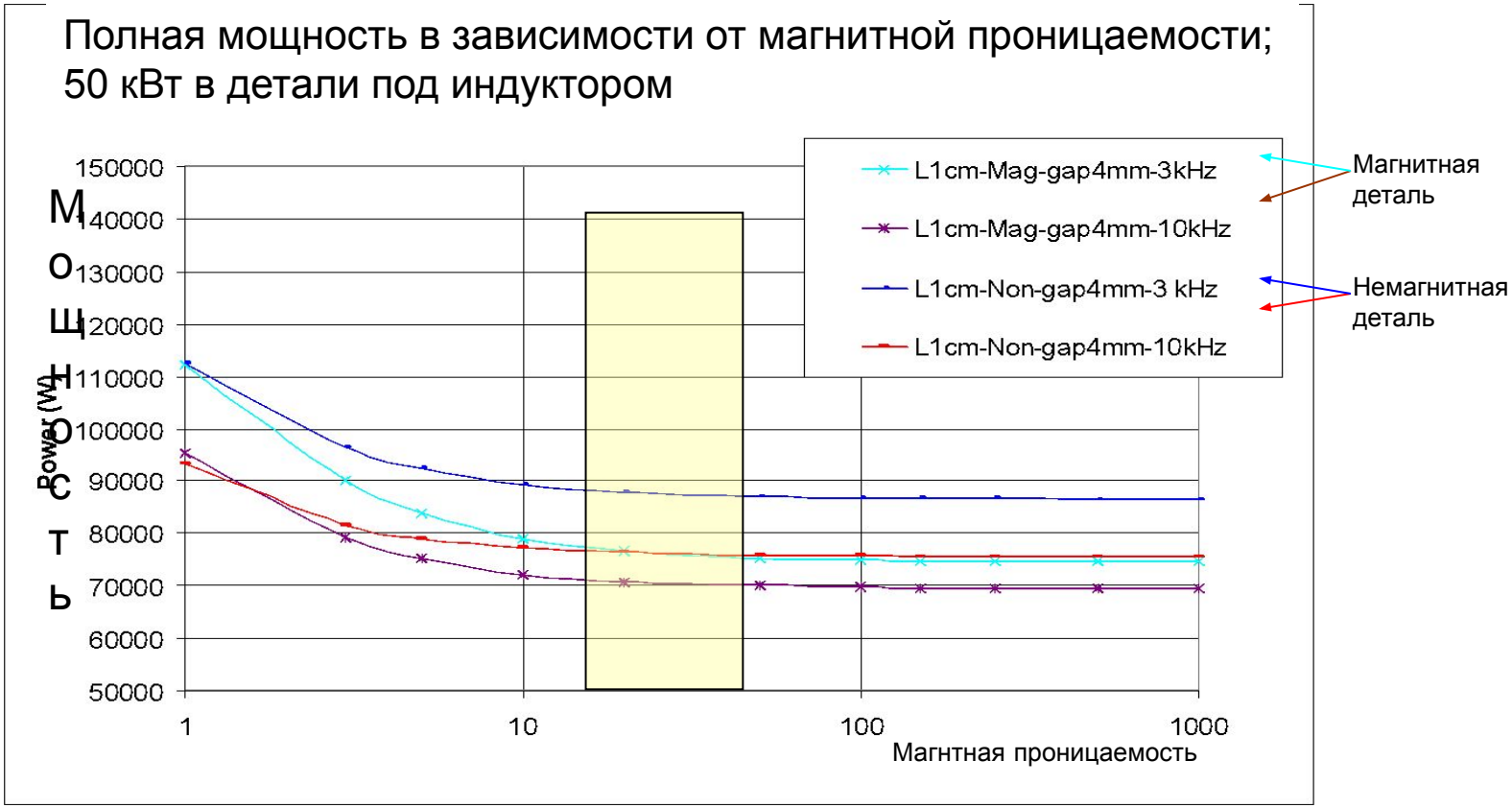
Частоты 3 и 10 кГц

Зависимость требуемого тока от проницаемости контроллера



Концентратор снижает потребность в токе на 40 - 50% при магнитной проницаемости 40 – 50, по сравнению с проницаемостью 1 (воздух). Очень малое снижение тока при более высокой магнитной проницаемости

Зависимость требуемой мощности от проницаемости контроллера



Концентратор снижает потребность в мощности на 25 - 30% при магнитной проницаемости 20 - 40. Мощности не меняется при увеличении магнитной проницаемости

Потери в магнитных материалах

- Потери зависят от типа материала, частоты и плотности магнитного потока
- Потери в концентраторе обычно значительно ниже, чем потери в меди
- Потери определяют температуру концентратора и, соответственно, влияют на качественную работу системы
- Высокаяя теплопроводность концентратора и его охлаждение позволяют контролировать температуру, даже при высоких потерях

Известно три типа потерь в магнитных материалах:

- Гистерезисные потери
- Потери от вихревого тока в концентраторе (“глобальные” потери от вихревых токов)
- “Локальные” потери от вихревого тока, т.е. потери в отдельных частицах, компонентах или зонах (листы шихтованной стали, частицы металла в МД)

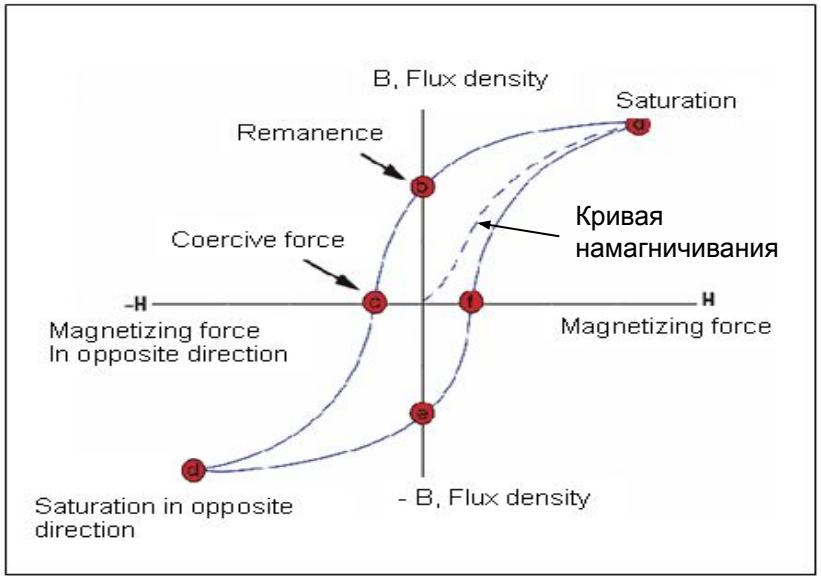
Гистерезисные потери

- Обусловлены “внутренним трением” микрочастиц магнитного материала в процессе их переориентации в переменном магнитном поле
- Зависят от свойств магнитного материала и условий эксплуатации
- Не зависят от размеров частиц (или толщины листов) и удельного электрического сопротивления материала
- Примерно пропорциональны частоте поля
- Отожженные материалы имеют более низкие гистерезисные потери
- Гистерезисные потери пропорциональны площади петли гистерезиса

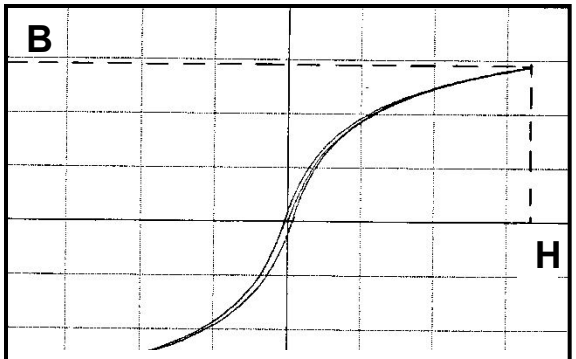
Петля гистерезиса мягкомагнитных материалов

Магнито “мягкие ” материалы имеют узкую петлю гистерезиса с малой коэрцитивной силой. Когда коэрцитивная сила очень мала, петля трансформируется в кривую (**кривая намагничивания** идеального материала без гистерезиса)

- Кривая намагничивания достигает насыщения в сильном магнитном поле, то есть при высокой напряженности поля
- Проницаемость обычно расчитывается из **кривой намагничивания,** как B/H для каждой точки кривой
- Когда материал намагничивается переменным током, индукция B движется вдоль границ петли (a – b – c – d – e – f – a) при напряженности меняющейся от минимума к максимуму
- Гистерезисные потери пропорциональны площади петли намагничивания и частотеж однако при той же напряженности площадь петли меняется с частотой



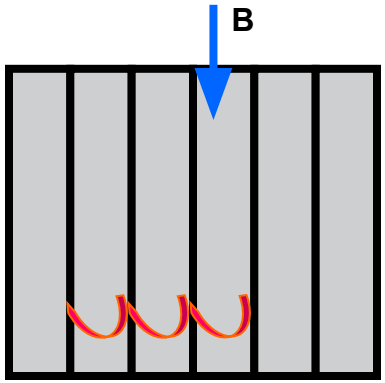
Петля намагничивания “мягко” магнитного материала. Ширина петли увеличена для удобства



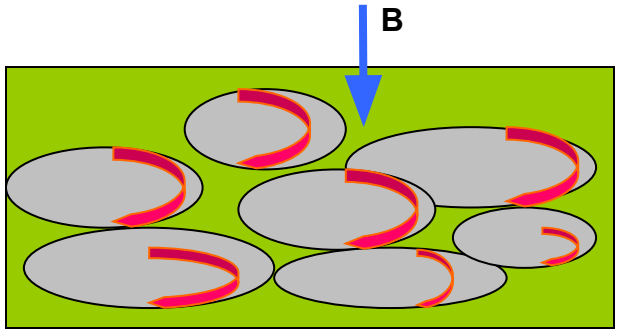
Петля гистерезиса Fluxtrol 25

Потери от вихревого тока

- В шихтованном железе:
  - зависят от частоты, типа стали, толщины листов и их ориентации в магнитном поле
- В магнитодиэлектриках:
  - зависят от частоты, размеров и ориентации частиц (для некруглых частиц)
  - Зависят от удельного сопротивления и магнитной проницаемостичастиц материала
- В феррите:
  - Зависят от проводимости материала, частоты и температуры
- Локальные вихревые потери примерно пропорциональны квадрату плотности магнитного поля и квадрату частоты
- При высоких частотах размеры частиц и толщина листов должны быть маленькими для уменьшения потерь



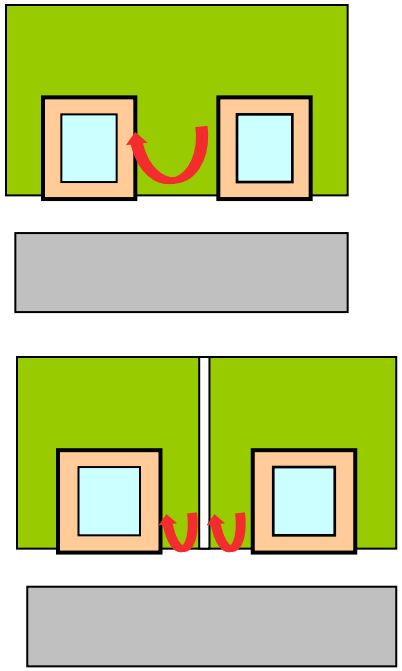
Местные потери от вихревого тока в листах шихтованного железа



Местные потери от вихревого тока в частицах магнитных композитов

Общие (глобальные) потери от вихревого тока

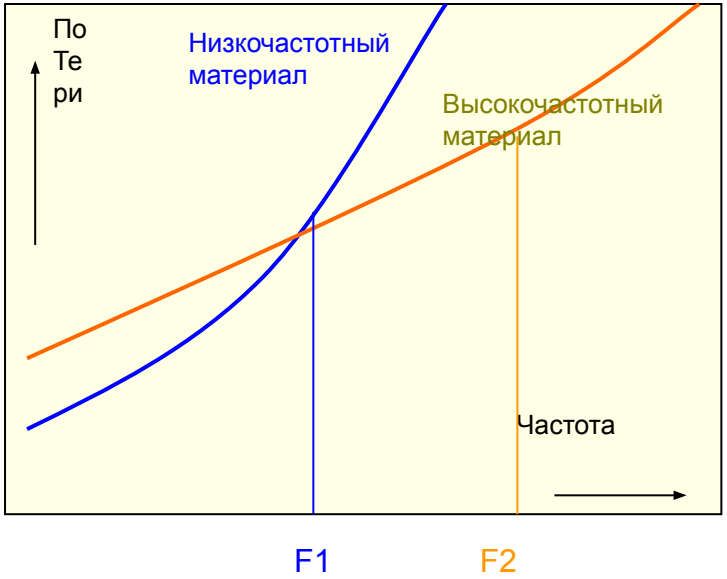
- Зависят от **размера концентратора** и его формы
- Зависят от “общего” удельного сопротивления материала of material
- Пропорциональны квадрату частоты поля
- Могут быть снижены электрическим “разделением” концентратора
- Когда поверхностная проводимость возрастает из-за “размазывания” частиц при прессовании, травление уменьшает потери



Слой изоляции предотвращает короткое замыкание между витками через концентратор и может способствовать снижению потерь

Зависимость полных потерь от частоты и плотности потока

- При одной и той же плотности потока, потери всегда растут с частотой
- При низкой они пропорциональны частоте (гистерезисные потери)
- При высоких частотах они примерно пропорциональны квадрату частоты (потери от вихревого тока)
- Потери зависят от B быстрее, чем B^2; обычно зависимость близка к $B^{2.1-2.2}$
- При выборе материала должны приниматься во внимание оба вида потерь в материале и его теплопроводность с тем, что бы держать под контролем его температуру

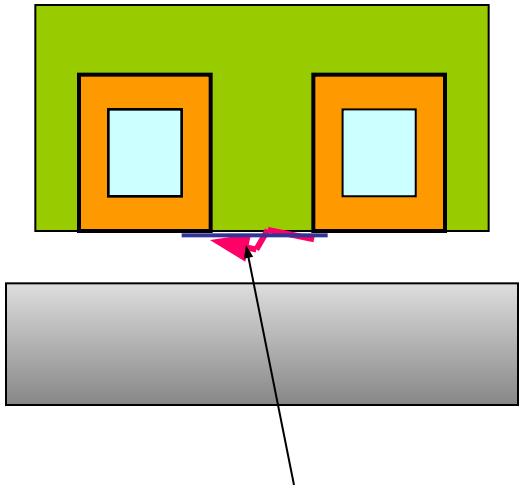


Полные потери двух магнитных материалов при одной и той же плотности потока

F1, F2 – рекомендованные пределы частоты

Электрическое сопротивление композита

- **Чем выше, тем лучше! Но высокое сопротивление находится в противоречии с магнитными и тепловыми свойствами…**
- Зависит от типа материала и его ориентации (анизотропия)
- Поверхностное сопротивление зависит от состояния его поверхности (прессованная, обработанная механически, шлифованная, излом…)
- Малое сопротивление может вызвать:
  - Короткое замыкание между витками индуктора через концентратор
  - Рост потерь благодаря из-за роста “общих” потерь от вихревого тока м
- Материалы с высоким сопротивлением могут выдерживать значительное неапряжение; так, материал Ferrotron 559 толщиной 1 мм выдерживает напряжение 90 В



Разряд между витками вдоль проводящей поверхности концентратора

Рекомендации по выбору материала

Электромагнитные характеристики:

- Магнитная проницаемость
- Насыщение
- Удельное электрическое сопротивление
- Потери на данной частоте

Тепловые характеристики:

- Теплопроводность
- Тепловая стойкость

Механические характеристики:

- Механическая прочность
- Твердость
- Обрабатываемость

Прочие:

- Удобство установки
- Химическая стойкость
- Специфические характеристики
- Цена

Важность каждой характеристики определяется типом применения

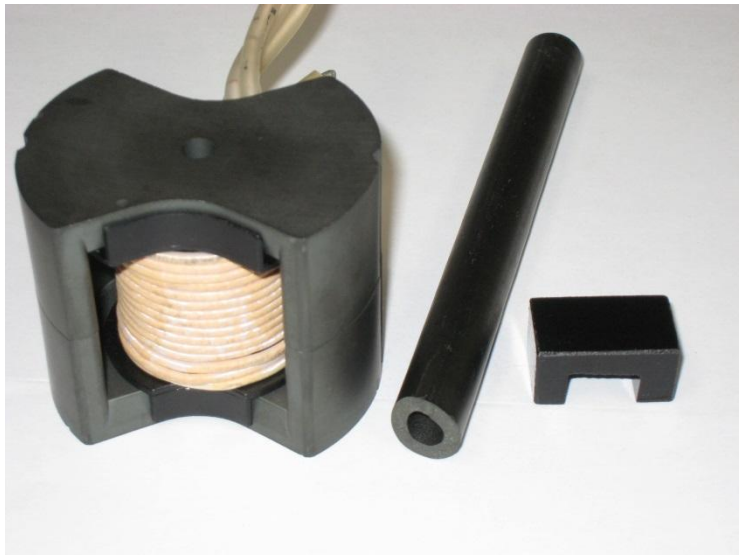
Шихтованное железо

- Очень высокая магнитная проницаемость (тысячи в слабых полях)
- Высокое температурное сопротивление, которое зависит от электрической изоляции листов
- Высокое насыщение (1.8 Т)
- Аморфное и нанокристаллическое железо имеет очень малые потери, но пригодно в основном для намотанных сердечников
- Имеет ограничение по частоте (ниже 30 кГц)
- Сложно осуществлять интенсивное охлаждение
- Установка трудоемка, особенно при сложной конфигурации индуктора
- Трудно обрабатывать
- Плохо работает в трехмерных полях
- Деформируется при нагреве и ржавеет
-

Сердечник из нано-кристаллического железа; хрупкость и окисление препятствуют его применению в индукционных системах

Ферриты

- Высокая магнитная проницаемость в слабых полях (до десятков тысяч)
- Работают при высоких частотах
- Некоторые виды имеют малые потери
- Низкое насыщение (0.3-0.4 Т)
- Низкая точка Кюри (~ 250 С), снижение магнитных свойств начинается при 150-200 С
- Низкая теплопроводность
- Плохие механические параметры
  - Очень твердые
  - Хрупкие
  - Для обработки требуется специальный инструмент
- Чувствительны к механическим и термическим ударам
- Трудно получить точные размеры без дополнительной обработки



Трансформатор, импедер и С – образный концентратор из феррита

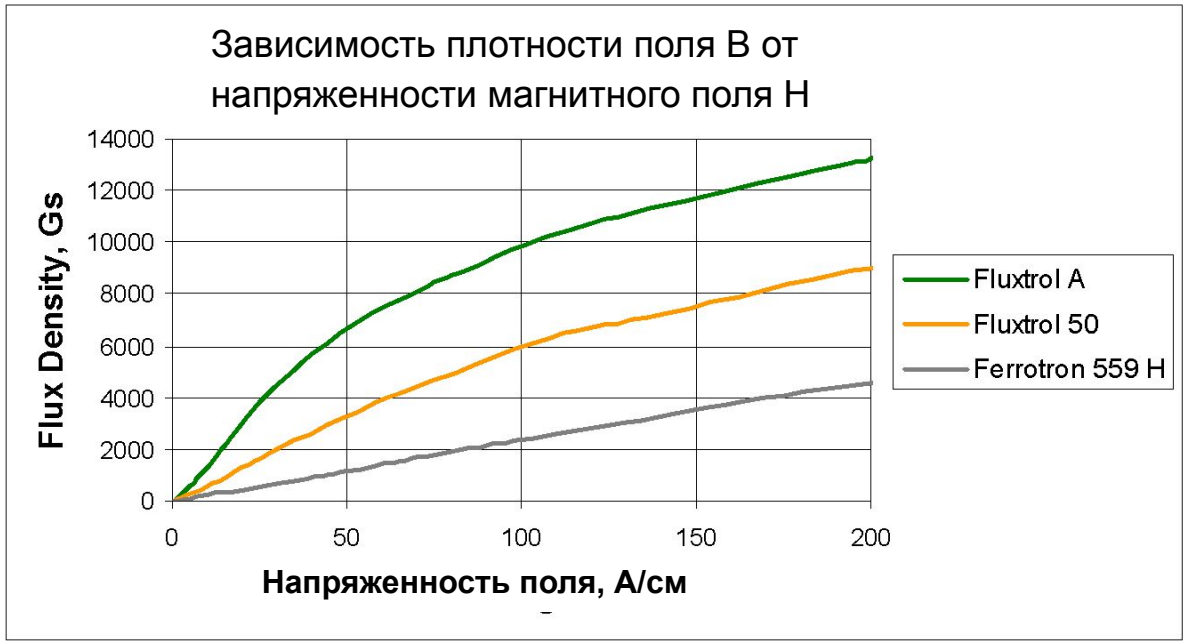
Материалы фирмы Fluxtrol Inc.

- Fluxtrol Inc. производит 3 основных и 2 дополнительных вида материалов
- Основные материалы:
  - **Fluxtrol A**
  - **Fluxtrol 50**
  - **Ferrotron 559H**
- Дополнительные материалы:
  - **Ferrotron 119**
  - **Fluxtrol 25**
  - **Custom materials**
- Fluxtrol Inc. выпускает широкий диапазон размеровк круглого и прямоугольного сечения. По требованию заказчика выполняются любые конфигурации образцов
- Материалы семейства Fluxtrol и Ferrotron, разработанные для индукционного нагрева, в настоящее время широко применяются и в других отраслях: для выращивания моно-кристаллов, для антенн ядерного магнитного резонанса, в медицине, пр.

Свойства материалов Fluxtrol Inc.

Properties	Units	Fluxtrol A	Fluxtrol 50	Ferrotron 559H
Product Identification Color		Green	Yellow	Grey
Density ± 2%	g/cm3	6.6	6.1	5.9
Operating Frequency Range	kHz	1–50	10–1000	10–3000
Major Frequency Area	kHz	3–30	50–500	50–1000
Initial Permeability	None	63	36	16
Maximum Permeability	None	120	55	19
Saturation Flux Density	Tesla	1.6	1.5	1.0
Temperature Resistance	Centigrade	250 Long Term 300 Short Term	250 Long Term 300 Short Term	250 Long Term 300 Short Term
Resistivity	kOhmcm	0.5	10	>15

Кривые намагничивания материалов Fluxtrol



По сравнению с шихтованным железом и ферритами, материалы Fluxtrol имеют почти линейные характеристики. Это значит, что материалы Fluxtrol практически не искажают формы кривых тока и напряжения. Искажения приводят к дополнительной реактивной мощности индуктора и росту потерь в трансформаторе и емкостных батареях

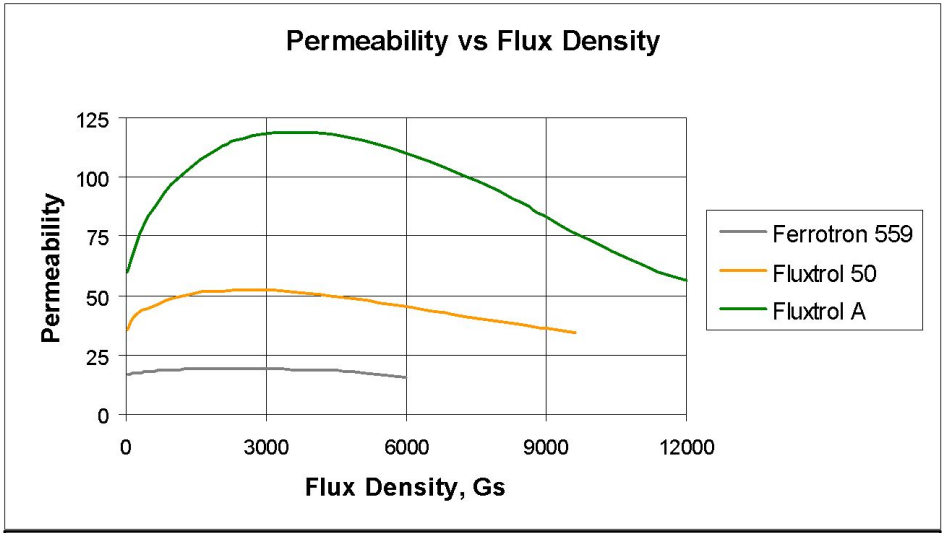
Магнитная проницаемость материалов Fluxtrol

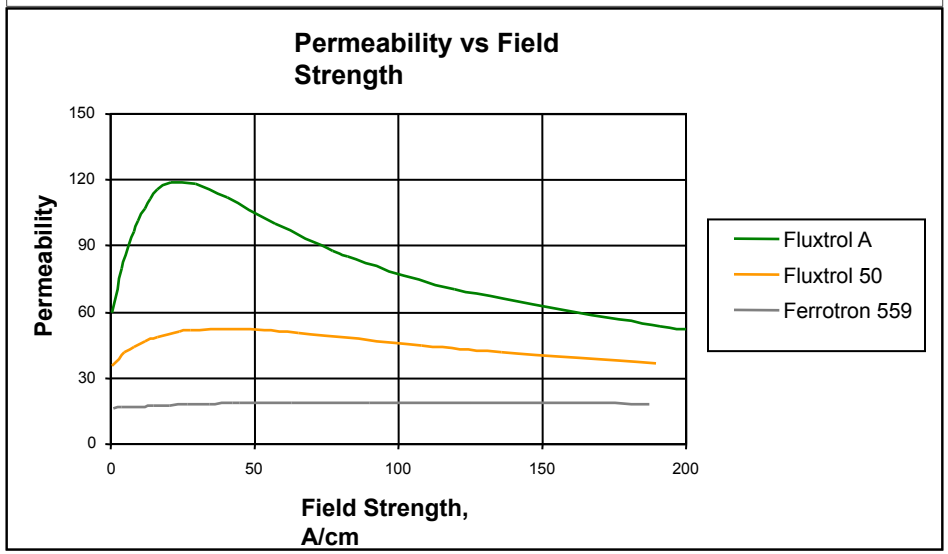
Материал Fluxtrol A имеет магнитную проницаемость 120 (макс) и 50 при высокой магнитной нагрузке (плотность потока до 12000 Гс)

Основная область применения по частоте – до 30 кГц

Материал может использоваться при более высоких частотах при соответствующих условиях (короткий цикл нагрева, интенсивное охлаждение)

Магнитная проницаемость измерена при10 кГц и благоприятном направлении магнитного потока

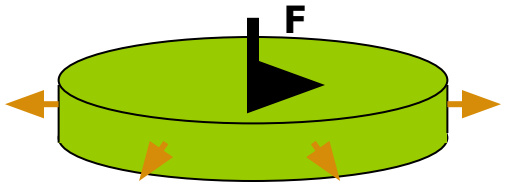


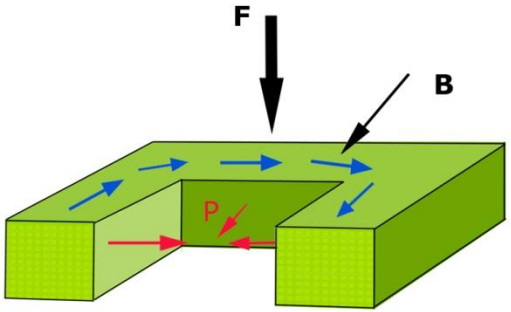


Анизотропия материалов Fluxtrol

Анизотропия материалов **Fluxtrol** и **Ferrotron** :

- **Fluxtrol A** имеет значительную анизотропию благодаря своей структуре. В направлении, перпендикулярном прессованию, магнитная проницаемость и теплопроводность высоки, а потери низки
- **Ferrotron 559H** имеет низкую анизотропию благодаря структуре материала и большему содержанию байндера
- **Fluxtrol 50** имеет анизотропию между
- **Fluxtrol A** & **Ferrotron 559H**
- Анизотропия **Fluxtrol A** даёт возможность использовать наилучшую комбинацию удельного электрического сопротивления, теплопроводности и магнитной проницаемости





Оптимальная ориентация материала

F – Направление прессования

B – Магнитная индукция

P – отвод тепла к индуктору

Выбор материалов Fluxtrol

Факторы при выборе материала:

- Диапазон частот
- Механическая прочность
- Тип индуктора и его размеры
- Нагрузка на концентратор (необходимая плотность магнитного потока B)
- Длительность цикла и условия отвода тепла
- Индивидуальные особенности (электрическая прочность и пр.)

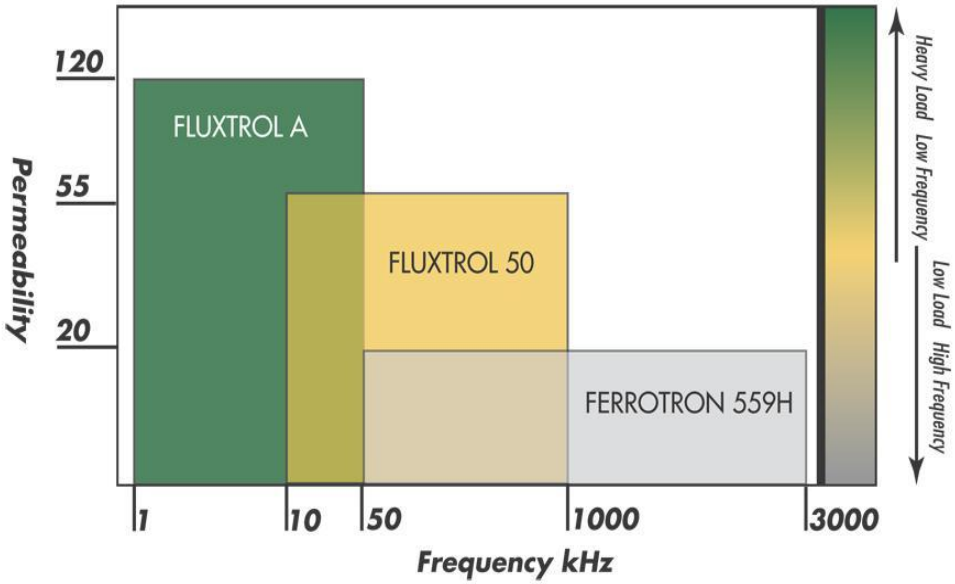


Схема выбора материала

Замечания:

- Частотный диапазон материалов перекрывается и два или даже три материала могут использоваться для одного и того же случая
- Все материалы могут работать при частотах ниже показанных; например Ferrotron 559 может быть использован при 10 кГц и даже ниже
- Низкочастотные материалы иногда могут быть использованы при более высоких частотах при соответствующем охлаждении

Травление

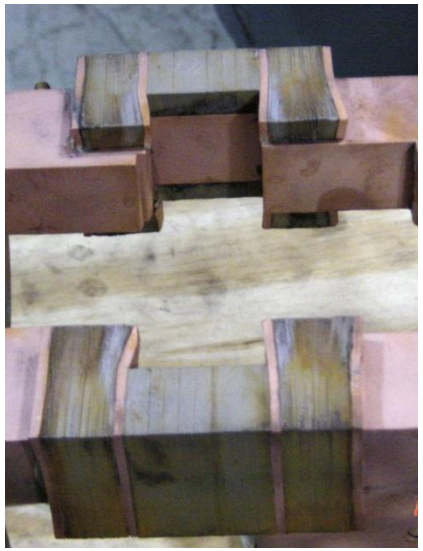
- **Травить или не травить?**
- **Основная цель:** Удалить или изменить проводящий слой на поверхности материала для повышения сопротивления и увеличения электрической прочности
- **Дополнительный выигрыш:**
  - Предотвращает ржавление
  - Удаляет пыль и улучшает качество поверхности для склеивания и специальных покрытий
- **Недостатки:**
  - Необходимость дополнительной операции
- **Рекомендации:**
  - Травление всегда полезно, но в большинстве случаев оно не необходимо
  - Травление азотной и хлорной кислотами не дает хорошего результата; материал может быть поврежден и процесс небезопасен
  - Может быть использована фосфорная кислота
  - Наилучший результат получается при использовании специального материала CrysCoat 187

Замена шихтованного железа материалами Fluxtrol

Материалы Fluxtrol A и **50** могут быть эффективно использованы вместо шихтованного железа

Достоинства контроллеров Fluxtrol:

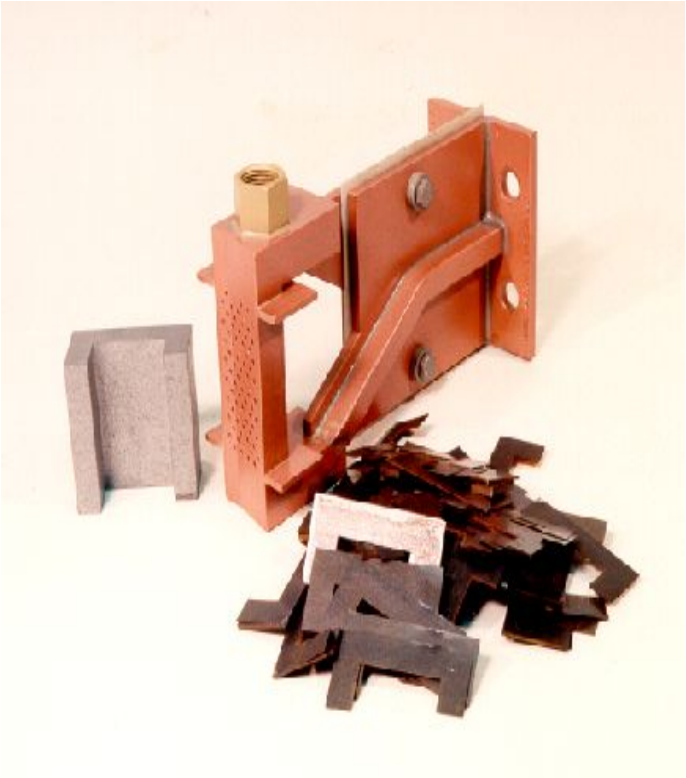
- Могут быть использованы при любых частотах
- Хорошо работают в трехмерных полях, что продлевает срок их службы
- Бо’льший срок службы индукторов в связи с меньшей токовой нагрузкой меди в краевых зонах
- Могут иметь любую форму
- Легко могут быть модифицированы по месту
- Менее трудоёмки в изготовлении, особенно при сложных конфигурациях контроллера



Пример: Шихтованное железо использовалось на закалочном индукторе на частоте 3 кГц
Из-за перегрева в зоне 3х мерных полей железо деформируется и искажается контур нагрева; после 13,000 циклов индуктор полностью разрушен
Индуктор с материалом Fluxtrol A проработал 50,000 и продолжает работать

Заключение

- Контроль магнитного потока является важной составной частью оптимизации дизайна индуктора; их применение должно рассматриваться как составная часть создания всей индукционной системы
- Магнитные контроллеры могут играть различную роль (перераспределять мощность, концентрировать нагрев, корректировать величину тока, экранировать и пр.) в зависимости от процесса
- Контроллеры могут одновременно решать несколько задач
- Использование магнитных контроллеров снижает ток индуктора и реактивную мощность, улучшая работу источника питания; иногда возможно использовать менее мощный генератор



Заключение

- Компьютерное моделирование и практический опыт показывают, что магнитная проницаемость контроллера свыше 60 – 100 не улучшает его работы в индукционных системах
- Магнитные контроллеры могут быть выполнены из магнитодиэлектриков (мягкомагнитные композиты Fluxtrol), тонких стальных листов или ферритов
- Шихтованное железо не может применяться при высоких частотах из-за больших потерь и плохой работе в трехмерных полях
- Ферриты имеют низкую индукцию насыщения, низкую точку Кюри, низкие термические и механические характеристики
- Магнитодиэлектрические материалы имеют хорошее сочетание магнитных, электрических, тепловых и механических характеристик, способствующих их эффективному применению в процессах индукционного нагрева