



Современная микропроцессорная техника предъявляет повышенные требования к габаритам и энергетическим характеристикам индуктивных элементов, применяемых в компактных источниках питания. Силовые дроссели должны иметь индуктивность до 100 μH при токе в несколько ампер. Существенным моментом при достижении минимальной высоты индуктивного элемента является правильный выбор формы и материала сердечника.

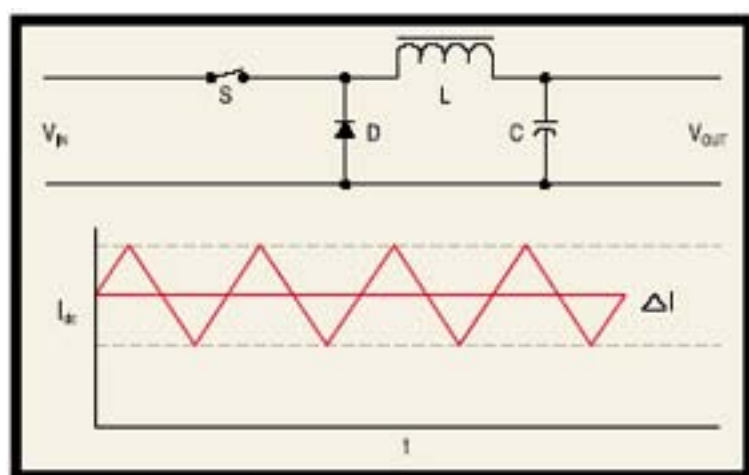


Рис. 1 Вольтодобавочный преобразователь

Тороидальные сердечники позволяют изготовить дроссель минимальной высоты. Одним из материалов, используемых для изготовления дросселей вольтодобавочных преобразователей, является **молибден-пермаллой** (Мо-пермаллой, Molypermalloy, MPP) с распределённым воздушным зазором. Серийно выпускаемые сердечники из Мо-пермаллоя имеют минимальную высоту около 0.7 мм. Альтернативным материалом для сердечников силовых дросселей является феррит с воздушным зазором. В этой статье мы проведём сравнение двух материалов, при этом целью будет достижение высоты всех

элементов преобразователя (включая дроссель) не более 1 мм.

Сердечники с зазором обычно используются в дросселях вольтодобавочных преобразователей (**Рис.1**). Во включённом состоянии сердечник такого дросселя должен обеспечить достаточную индуктивность при протекании через обмотку значительных токов. Индуктивность обмотки пропорциональна эффективной магнитной проницаемости материала сердечника:

$$L = 0.4 \pi \mu_e N^2 A_e 10^{-8} / L_e$$

(1)

где:

L = индуктивность, Гн
 μ_e = эффективная проницаемость
 N = число витков
 A_e = эффективная площадь сечения, см²
 L_e = длина пути магнитной линии, см

Большинство преобразователей работают в непрерывном режиме обмотки, при котором ключ S (Рис.1) вновь замыкается в тот момент, когда ток через обмотку ещё не снизился до нуля. Среднее значение тока, протекающего через обмотку, рассматривается как ток постоянного подмагничивания, поэтому можно оценить уменьшение индуктивности, вызываемое постоянной составляющей. Напряжённость магнитного поля составляет:

$$H = 0.4 \pi N I / L_e \quad (2)$$

где:

H = постоянная составляющая напряжённости магнитного поля, Эрстед

N = число витков

I = ток, Ампер

L_e = длина пути магнитной линии, см

Построив график зависимости проницаемости сердечника при увеличении намагничивающей силы, легко убедиться в уменьшении индуктивности обмотки с возрастанием тока, протекающего через обмотку.

Тороидальные сердечники

Сердечники из феррита и Мо-пермаллоя производятся в виде тонких (низкопрофильных) колец, напоминающих шайбы. Тороидальные сердечники дают определённые преимущества в случаях, когда необходимо получить минимальную общую высоту индуктивного компонента. Они не требуют каркаса для обмотки, имеют невысокую стоимость, обеспечивают хороший отвод тепла и экранирование магнитного поля.

Низкопрофильные кольца из Мо-пермаллоя выпускаются в трёх типоразмерах из четырёх марок материалов, как показано в Табл.1 и Табл.2 Для колец такого размера стоимость материала незначительна. Основной составляющей цены являются затраты на придание сердечнику тороидальной формы при помощи пресса. Однако, современные технологии производства малогабаритных колец из Мо-пермаллоя позволяют снизить их стоимость до уровня цен на ферритовые кольца с зазорами аналогичного диаметра.

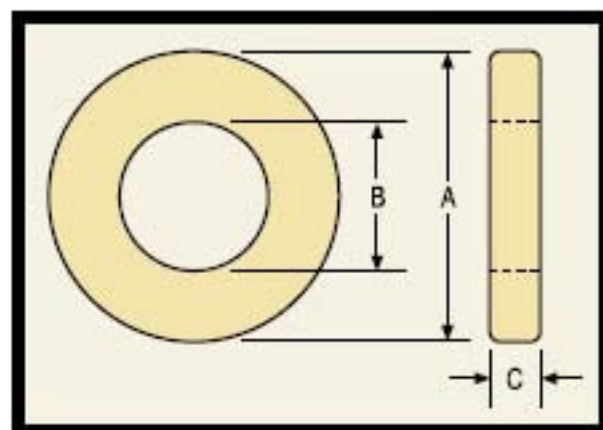
Part No.		A nom.	B nom.	C nom.	A max.	B min.	C max.*
M-0302-T	in. (mm)	0.140 (3.55)	0.070 (1.78)	0.030 (.76)	0.143 (3.63)	0.067 (1.70)	0.035 (.89)
M-0502-T	in. (mm)	0.181 (4.60)	0.093 (2.36)	0.030 (.76)	0.185 (4.70)	0.089 (2.26)	0.035 (0.89)
M-0804-T	in. (mm)	0.310 (7.87)	0.156 (3.96)	0.030 (.76)	0.315 (8.00)	0.151 (3.83)	0.035 (0.89)

Табл. 1 Размеры сердечников * Специальные значения толщины обеспечиваются производителем

Part No.	AL mH/1000 turns $\pm 15\%$				Pat Length Le (cm)	Cross Section Ae (cm ²)	Volume Ve (cm ³)
	125 m	160 m	200 m	250 m			
M0302-T***	11.6	14.8	18.7	23.4	0.806	0.0060	0.0048
M0502-T***	11.7	15.0	18.7	23.4	1.058	0.0079	0.0083
M0804-T***	12.6	16.2	20.2	25.3	1.789	0.0145	0.0259

Табл.2 Размеры и проницаемости сердечников. *** заменить на марку материала, напр., 125

Введение воздушного зазора смещает кривую намагничивания (Рис.2), что позволяет сердечнику с зазором выдерживать большие значения намагничивающей силы, чем сердечник без зазора. Для увеличения максимальной напряжённости магнитного поля используют два типа зазоров. Сердечники из прессованных порошковых материалов (Мо-пермаллой, альсифер, распылённое железо) имеют т.н. распределённый воздушный зазор. В ферритовые кольца вводят одиночный или двойной зазор со смещением 180° (Рис. 3).



Пояснение к таблицам

Увеличение зазора расширяет диапазон значений напряжённости магнитного поля до возникновения следующих практических ограничений:

- размещение необходимого числа витков обмотки при заданном внутреннем диаметре кольца;
- сохранение достаточно высокой эффективной проницаемости для удержания магнитного поля внутри структуры кольца;
- изготовление слишком большого зазора экономически неэффективно.

Зависимость μ_e от H_{dc} : график зависимости эффективной проницаемости от напряжённости постоянной составляющей магнитного поля позволяет определить уменьшение индуктивности при увеличении значения постоянного тока, протекающего через обмотку. На **Рис. 4** показаны зависимости μ_e от H_{dc} для различных марок материалов.

Температура

Сердечники из Мо-пермаллоя и феррита выпускаются с тонким изолирующим покрытием из полипропилена, имеющим высокую сопротивляемость неблагоприятным факторам воздействия окружающей среды. Малая толщина покрытия позволяет свести к минимуму изменение геометрических размеров сердечника, при этом обеспечивается действующее значение напряжение

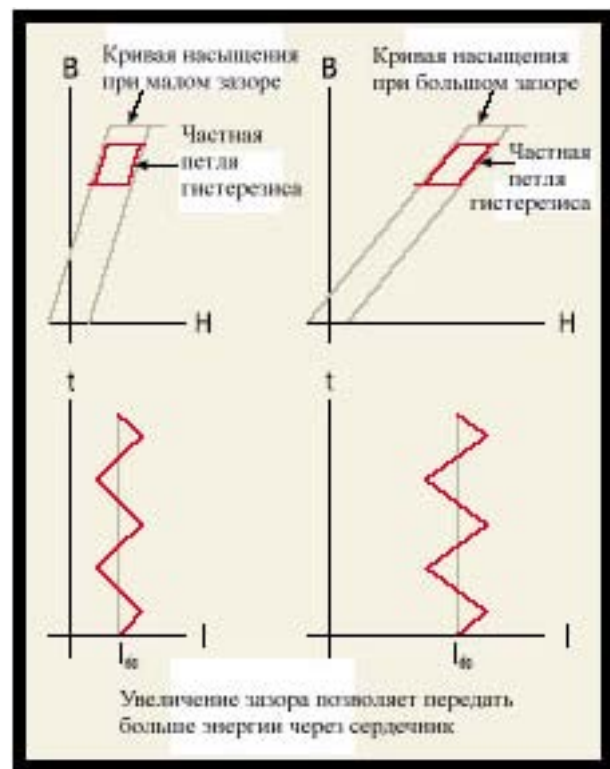


Рис. 2 Влияние зазора на параметры магнитопровода

пробоя между обмоточным проводом и сердечником не менее 300В. Максимальная постоянная рабочая температура полипропиленового покрытия составляет 130°C, но допускается кратковременное повышение до 200°C. Высокая рабочая температура не влияет на магнитные свойства сердечников из Мо-пермаллоя, так как температура Кюри составляет обычно 460°C.

Сердечники из Мо-пермаллоя не содержат связующего компонента, поэтому не нуждаются в искусственном старении. Необходимая прочность достигается воздействием высокого давления на исходные частицы порошка при формировании кольца в прессе. При этом обеспечивается надёжное сцепление между отдельными частицами с сохранением их обособленности. Последующий обжиг снимает излишнее напряжение в материале и обеспечивает требуемые магнитные характеристики.

Силовые марки ферритов имеют типичное значение температуры Кюри около 250°C, но эпоксидный слой между двумя половинками кольца обычно накладывает ограничение рабочей температуры в 150°C.

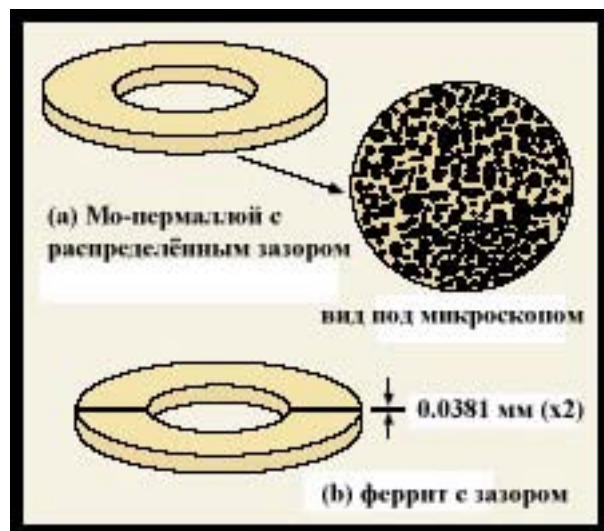


Рис. 3 Зазоры: (а) Мо-пермаллой (b) феррит

Потери в сердечнике и обмотке

При условии, что постоянный ток не вызывает насыщения сердечника, потери в нём определяются размахом тока, или ΔI (**Рис. 1**). Обычно, при непрерывном режиме работы преобразователя потери в обмотке превышают потери в сердечнике. Потери в сердечнике из Мо-пермаллоя превышают потери аналогичного сердечника из феррита. При стандартных условиях испытания (100 кГц, 100 мТл) типичные силовые марки ферритов имеют уровень потерь около 100 мВт/см³, в то время как потери в сердечниках из Мо-пермаллоя достигают 400 мВт/см³. Это очевидное преимущество ферритов нивелируется необходимостью введения в сердечник воздушного

зазора. Относительно большой воздушный зазор увеличивает потери в сердечнике, о чём обычно забывают при сравнении потерь различных материалов. Потери в зазоре заметно увеличивают совокупные потери в сердечнике из-за значительного искажения поля в зазоре. При этом линии магнитного поля могут пересекать провода обмоток, наводя в них чрезмерные вихревые токи. Избежать этого можно путём соответствующего распределения обмоток по поверхности кольца относительно зазора.

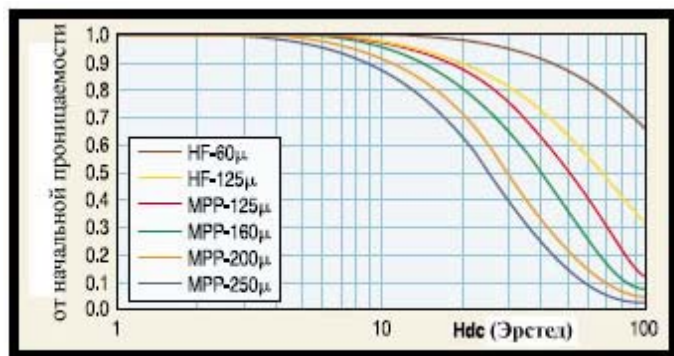


Рис. 4 Зависимость проницаемости от H_{dc}

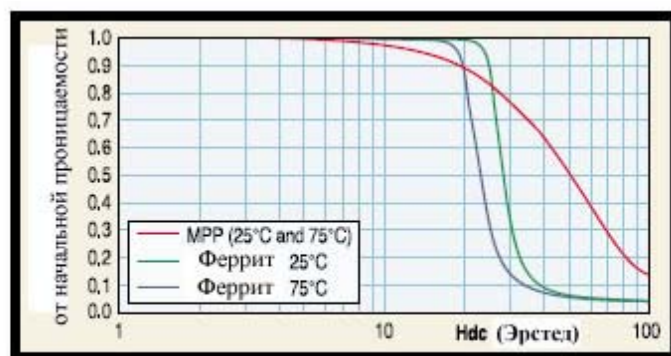


Рис. 5 Зависимость проницаемости от H_{dc} при 25° и 75°

На **Рис. 6** показаны сравнительные кривые потерь колец одинакового размера из Мопермаллоя с проницаемостью 125 (MPP125) и феррита с зазором, обеспечивающим эффективную проницаемость, также равную 125. В связи со сложностью измерения потерь у колец малых размеров для экспериментов были взяты более крупные кольца.

Помимо выбора сердечника, весьма существенным является правильный выбор обмоточных проводов. Традиционная методика расчёта, учитывающая плотность тока, не всегда обеспечивает корректный результат. Допустимый нагрев проводов должен быть ограничен, но выбор диаметра для наихудшего случая обычно влечёт применение более толстых, чем необходимо, проводов. Поэтому, целесообразно предусматривать работу при максимальном токе нагрузки в течение непродолжительного времени, например, «холодного старта» или заряда полностью разряженного аккумулятора, что позволит использовать провод оптимального диаметра. Для обеспечения хорошего отвода тепла рекомендуется выполнять намотку в один слой. Однослойная намотка обеспечивает минимальную межвитковую ёмкость, что уменьшает потери при работе на высоких частотах, и минимальную высоту дросселя.

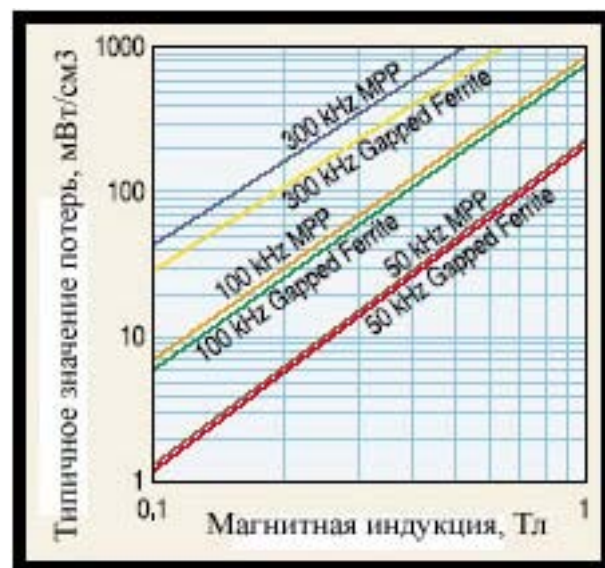


Рис.6 Сравнительные характеристики потерь MPP и феррита с зазором

По материалам журнала
Power Electronics Technology,
© 2002 All Rights Reserved

Перевод: Терейковский А.С.