

Моделирование индуктивностей с порошковыми сердечниками

при помощи симулятора LTspice

Валентин Володин

valvolodin@narod.ru

Порошковые сердечники состоят из мелких зерен ферромагнитного материала на основе железа или никеля, скрепленных между собой с помощью специального связующего диэлектрика, обеспечивающего электрическую изоляцию между отдельными зернами. По этой причине подобные магнитные материалы еще называют магнитодиэлектриками. Немагнитные промежутки между отдельными зернами в сумме формируют значительный распределенный немагнитный зазор, уменьшающий магнитную проницаемость сердечника. В свою очередь, значение магнитной проницаемости порошкового сердечника зависит от удельного содержания ферромагнитного порошка и увеличивается при его возрастании.

Наличие распределенного зазора внутри порошковых сердечников позволяет использовать их в условиях сильного одностороннего или двухстороннего намагничивания. Например, подобные условия возникают в сердечниках сглаживающих дросселей выпрямителей и корректоров коэффициента мощности (ККМ), в сердечниках дросселей переменного тока, в сердечниках трансформаторов различных однотактных преобразователей и т. п. Распределенный немагнитный зазор порошковых сердечников дает им определенные преимущества перед классическими магнитными с сосредоточенными зазорами: в последних магнитное поле выходит за пределы сечения сердечника («выпучивается»), что приводит к уменьшению эффективной длины зазора, а также к увеличению уровня внешних полей электромагнитного узла. Поэтому, при прочих равных условиях, электромагнитные изделия на порошковых сердечниках более технологичны, а также имеют меньшие габариты и менее интенсивные внешние поля рассеяния.

В настоящее время многие отечественные и зарубежные производители выпускают сердечники из различных порошковых материалов. Причем некоторые аналогичные типы магнитных материалов различаются по названиям. Например, Sendust («сендаст»), альсифер и Koool Мс — это один и тот же магнитный материал. То же касается МРР, Мопермаллоя и прессперма.

Конечно, производители обеспечивают потенциальных потребителей разнообразными справочными данными, методиками расчета, а также простейшими компьютерными программами. Однако современному разработчику, владеющему программами моделирования электронных схем, мало произвести конструктивный расчет того или иного электромагнитного узла, нужна корректная модель этого узла,

которую можно вставить в модель разрабатываемого электронного устройства.

В данной статье рассматриваются возможности симулятора LTspice, позволяющего моделировать нелинейную индуктивность двумя способами.

Первый способ задания нелинейной индуктивности использует аналитическую зависимость (аналитическая модель):

$$\Psi = L \cdot I.$$

Данная зависимость устанавливает связь между потокосцеплением Ψ , индуктивностью L и током I , протекающим через катушку индуктивности. В свою очередь, потокосцепление равно произведению магнитного потока Φ на количество витков N катушки индуктивности, сцепленных с этим потоком:

$$\Psi = \Phi \cdot N.$$

Для задания индуктивности в поле **Inductance** окна настройки нужно ввести выражение, связывающее потокосцепление, обозначаемое ключевым словом **Flux**, и тока, для обозначения которого используется символ **x**. В следующем примере описанным способом создается линейная индуктивность величиной 1 Гн:

$$L1. N001. 0. Flux = x.$$

Рассматриваемый способ может оказаться полезным, если известны зависимости, связывающие магнитную индукцию B с напряженностью магнитного поля H . Подобные зависимости, например, можно обнаружить в справочной документации компании Magnetics [1], производящей ферритовые и порошковые магнитные сердечники. Техническая информация на порошковые магнитные материалы приводится в документации [2]. Здесь же можно найти аналитическое выражение, описывающее кривую намагничивания материала в области положительной индукции и напряженности магнитного поля:

$$B = \left[\frac{a + bH + cH^2}{1 + dH + eH^2} \right]^x.$$

В оригинальной документации используются единицы измерения системы СГС. При этом индукция измеряется в кГс (10 кГс = 1 Тл), а напряженность магнитного поля — в эрстедах (1 А/м = $4\pi \times 10^{-3}$ = 0,012566 Э). Использование непривычной системы измерения приносит определенные неудобства, и, чтобы их избежать, пересчитаем все коэффициенты в систему СИ (табл. 1).

При этом формулу нам также придется немного изменить:

$$B = 0,1 \times \left[\frac{a + bH + cH^2}{1 + dH + eH^2} \right]^x \quad (1)$$

На рис. 1-4 изображены кривые намагничивания, представленные в единицах СИ.

На рис. 5 приведен пример моделирования нелинейного дросселя, намотанного на тороидальном сердечнике 55122 из Мо-пермаллоя (MPP) с проницаемостью 26. Сердечник имеет среднюю длину магнитной силовой линии $L = 31,2$ мм и сечение $S = 0,192$ см². На сердечник намотана обмотка $N = 90$ витка.

Для ввода коэффициентов аналитической зависимости и параметров сердечника используем директиву .PARAM:

```
.param a=211.2m b=349u c=-3.59n
d=111u e=-1.23n x=2 n=90 l=41.1m s=19.2u
```

Индуктивность нелинейного дросселя задается выражением:

$$\text{Flux} = 0.1 * \{n\} * \{s\} * ((\{a\} + \{b\} * \{n\} * \{x\} / \{l\}) + \{c\} * (\{n\} * \{x\} / \{l\}) ** 2) / (1 + \{d\} * \{n\} * \{x\} / \{l\} + \{e\} * (\{n\} * \{x\} / \{l\}) ** 2) ** \{x\}$$

Таблица 1. Коэффициенты аналитической зависимости индукции от напряженности для порошковых материалов производства компании Magnetics

a	b	c	d	e	x	μ	Тип материала
-23,74	0,208	1,46·10 ⁻⁴	0,778	4,99·10 ⁻⁵	2	14	MPP
0,2112	3,49·10 ⁻⁴	-3,59·10 ⁻⁹	1,11·10 ⁻⁴	-1,23·10 ⁻⁹	2	26	
0,2576	7,41·10 ⁻⁴	1,91·10 ⁻⁸	2,48·10 ⁻⁴	7,55·10 ⁻⁹	2	60	
0,0642	-6,27·10 ⁻⁴	3,25·10 ⁻⁶	9,90·10 ⁻⁵	5,37·10 ⁻⁸	0,5	125	
0,0653	-7,30·10 ⁻⁴	4,52·10 ⁻⁶	1,58·10 ⁻⁴	7,18·10 ⁻⁸	0,5	147	
0,0545	-7,72·10 ⁻⁴	6,51·10 ⁻⁶	6,87·10 ⁻⁵	1,02·10 ⁻⁷	0,5	173	
0,0447	-5,58·10 ⁻⁴	5,21·10 ⁻⁶	1,00·10 ⁻⁴	8,16·10 ⁻⁸	0,5	160	
0,1001	-0,00145	9,13·10 ⁻⁶	6,06·10 ⁻⁵	1,43·10 ⁻⁷	0,5	200	
0,094	-0,00154	1,99·10 ⁻⁵	2,40·10 ⁻⁴	3,07·10 ⁻⁷	0,5	300	
0,073	-0,00151	6,48·10 ⁻⁵	6,37·10 ⁻⁴	9,93·10 ⁻⁷	0,5	550	
-0,188	2,75·10 ⁻⁴	1,15·10 ⁻⁷	5,29·10 ⁻⁴	3,47·10 ⁻⁸	2	14	High Flux
-0,1286	5,18·10 ⁻⁴	1,18·10 ⁻⁷	5,32·10 ⁻⁴	3,41·10 ⁻⁸	2	26	
-0,536	0,00384	3,84·10 ⁻⁶	0,00694	1,02·10 ⁻⁶	2	60	
0,0532	-6,81·10 ⁻⁴	3,51·10 ⁻⁶	1,05·10 ⁻⁴	1,69·10 ⁻⁸	0,5	125	
0,0774	9,75·10 ⁻⁴	4,26·10 ⁻⁶	1,97·10 ⁻⁵	2,22·10 ⁻⁸	0,5	147	
0,0267	-5,32·10 ⁻⁴	4,71·10 ⁻⁶	2,22·10 ⁻⁵	2,46·10 ⁻⁸	0,5	160	
0,005868	9,36·10 ⁻⁵	9,01·10 ⁻⁸	-3,68·10 ⁻⁶	8,75·10 ⁻⁹	0,5	26	Kool Mμ
0,00887	5,59·10 ⁻⁵	2,70·10 ⁻⁷	2,93·10 ⁻⁶	2,57·10 ⁻⁹	0,5	40	
0,01658	2,30·10 ⁻⁵	7,30·10 ⁻⁷	5,91·10 ⁻⁵	6,05·10 ⁻⁹	0,5	60	
0,01433	9,72·10 ⁻⁵	1,32·10 ⁻⁶	7,25·10 ⁻⁵	1,13·10 ⁻⁸	0,5	75	
0,0566	-1,22·10 ⁻⁴	1,97·10 ⁻⁶	7,28·10 ⁻⁵	1,70·10 ⁻⁸	0,5	90	
0,007808	5,09·10 ⁻⁴	2,59·10 ⁻⁶	3,92·10 ⁻⁵	2,28·10 ⁻⁸	0,5	125	
-0,536	0,00415	3,84·10 ⁻⁶	0,00741	8,84·10 ⁻⁷	2	60	Xflux

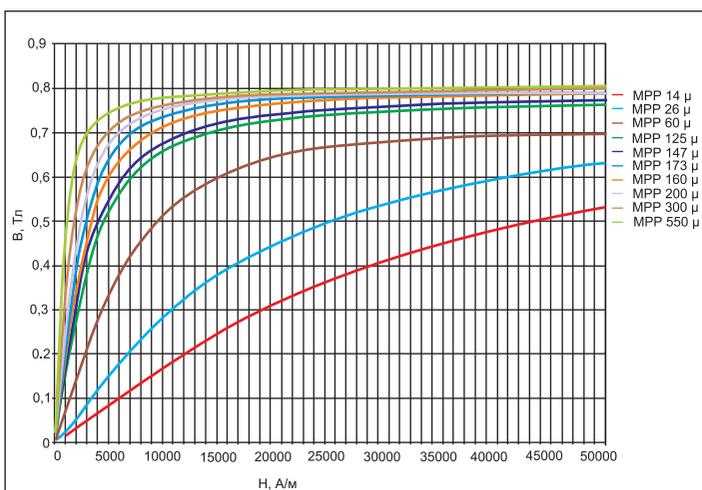


Рис. 1. Кривые намагничивания для порошковых сердечников на основе MPP

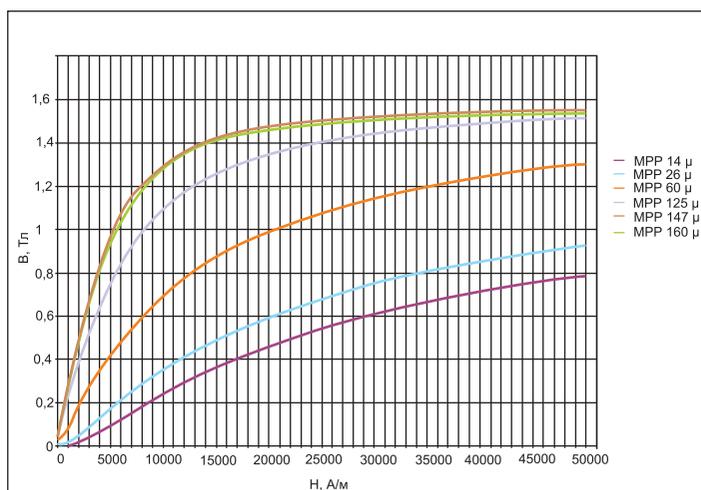


Рис. 2. Кривые намагничивания для порошковых сердечников на основе High Flux

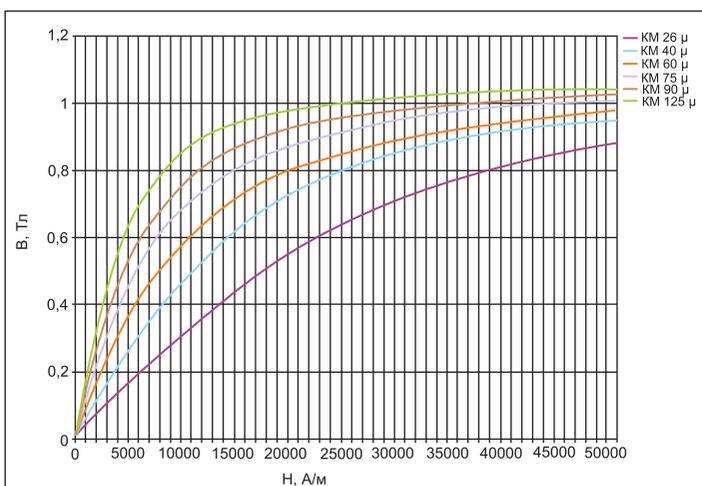


Рис. 3. Кривые намагничивания для порошковых сердечников на основе Kool Mm

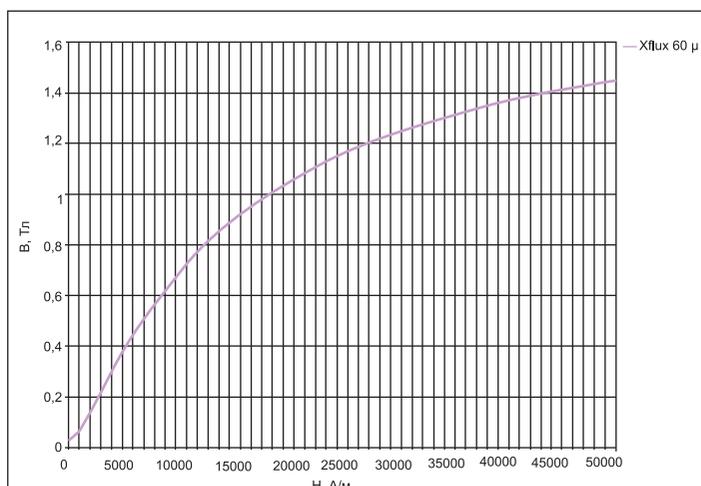


Рис. 4. Кривые намагничивания для порошковых сердечников на основе Xflux

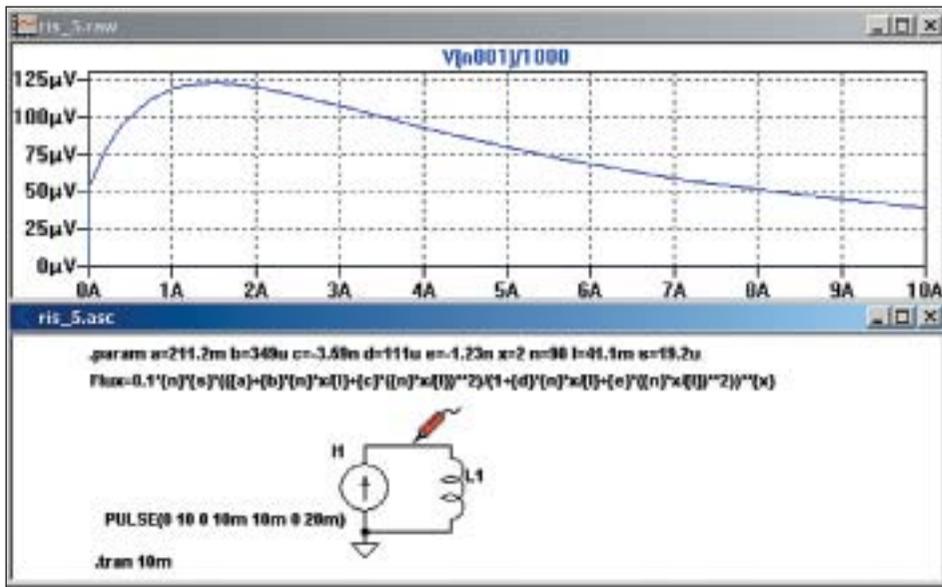


Рис. 5. Задание нелинейной индуктивности с помощью выражения

Результирующее текстовое описание схемы примера должно выглядеть следующим образом:

```
* C:\Program Files\LTCLTspice\Ivris_5.asc
I1 0 N001 PULSE(0 10 0 10m 10m 0 20m)
L1 N001 0
Flux=0.1*(n)*(s)*((a)+(b)*(n)*x/(l)+(c)*((n)*x/
(l)**2)/(1+(d)*(n)*x/(l)+(e)*((n)*x/(l)**2)**x)
.param a=44.7m b=-558u c=5.21u d=100u e=81.6n
x=0.5 n=33 l=31.2m s=11.4u
.tran 10m
.backanno
.end
```

Целью моделирования является исследование зависимости индуктивности нелинейного дросселя от тока, протекающего через его обмотку. Для этого от источника тока I1 через обмотку дросселя пропускается ток, линейно нарастающий со скоростью $dI/dt = 1000$ А/с. В этом случае напряжение на дросселе будет определяться зависимостью $V = L \times (dI/dt)$. Чтобы величина этого напряжения численно равнялась текущей индуктивности, его необходимо уменьшить в 1000 раз.

По результатам моделирования (рис. 5) видно, что индуктивность дросселя минимальна в области малых токов, затем резко возрастает до максимального значения 122,8 мкГн при токе 1,5 А и далее плавно снижается по мере нарастания тока. При токе 3,5 А дроссель имеет индуктивность 100 мкГн.

Данная модель позволяет оценить индуктивность дросселя при различных уровнях подмагничивания его сердечника. Однако она не способна имитировать потери, связанные с перемагничиванием сердечника, и поэтому плохо подходит для полноценного моделирования.

Второй способ позволяет использовать упрощенную гистерезисную модель магнит-

Таблица 2. Основные параметры петли гистерезиса

Параметр	Описание
H_c , А/м	Козерцитивная сила
B_r , Тл	Остаточная индукция
B_s , Тл	Индукция насыщения

ного сердечника, которую впервые предложили Джон Чан и др. [3]. Модель использует только основные параметры петли гистерезиса, перечисленные в табл. 2.

Восходящий и нисходящий участки петли гистерезиса моделируются при помощи следующих выражений:

- для восходящего участка

$$B_{up}(H) = B_s \times \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c \times (B_s / B_r - 1)} + \mu_0 \times H$$

- для нисходящего участка

$$B_{dn}(H) = B_s \times \frac{H - H_c}{|H - H_c| + H_c \times (B_s / B_r - 1)} + \mu_0 \times H,$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума.

Начальная кривая намагничивания моделируется выражением: $B(H) = (B_{up}(H) + B_{dn}(H))/2$.

Наряду с параметрами петли гистерезиса при описании нелинейной индуктивности учитываются линейные размеры сердечника, а также количество витков катушки (табл. 3).

Таблица 3. Основные параметры сердечника и катушки

Параметр	Описание
L_m , м	Средняя длина магнитной линии (исключая немагнитный зазор)
L_g , м	Длина немагнитного зазора
A , м ²	Сечение сердечника
N	Количество витков

По сравнению с аналитической, гистерезисная модель больше подходит для моделирования порошковых сердечников, так как имитирует предельные и частные циклы перемагничивания магнитного материала [4]. Это позволяет определять потери перемагничивания в процессе моделирования.

Настройка гистерезисной модели индуктивности с порошковым сердечником

Допустим, нам нужно промоделировать процессы, происходящие в дросселе ККМ, работающего на частоте 100 кГц. Дроссель намотан на кольцевом порошковым сердечнике № 58254 из материала High Flux с начальной магнитной проницаемостью $\mu = 125$. Такие сердечники производятся компанией Magnetics [1]. Обмотка дросселя содержит 1000 витков.

Для настройки гистерезисной модели дросселя с порошковым сердечником необходимо собрать тестовую модель (рис. 6).

Согласно данным производителя, сердечник № 58254 имеет следующие конструктивные параметры:

- габариты 40,8×23,3×15,3 мм;
- сечение $A = 107,2$ мм² = 0,0001072 м²;
- средняя длина магнитной линии $L_m = 9,84$ см = 0,0984 м;
- объем $V_c = 10,5$ см³ = 0,0000105 м³.

Длину немагнитного зазора можно вычислить, исходя из начальной проницаемости μ магнитного материала, которая показывает,

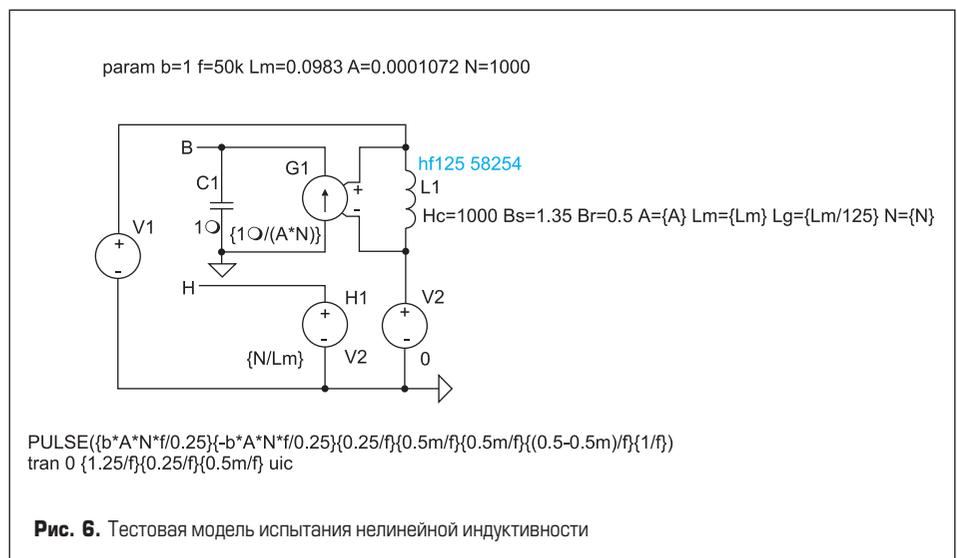


Рис. 6. Тестовая модель испытания нелинейной индуктивности

во сколько раз проницаемость сердечника выше проницаемости вакуума. Следовательно, длину зазора можно вычислить по формуле:

$$L_g = L_m / \mu.$$

Относительная длина немагнитного зазора обратно пропорциональна проницаемости сердечника:

$$L_g / L_m = 1 / \mu$$

Вычисленные по этой формуле значения относительной длины зазора для различных значений проницаемости приведены в табл. 4

Чтобы не отвлекать себя вычислениями в процессе работы, доверим всю рутинную работу симулятору LTspice. Для этого исходные данные необходимо ввести с помощью директивы .PARAM:

```
.param b=1.3357 f=100k Lm=0.0984
A=0.0001072 N=1000,
```

где b — определяет желаемую максимальную индукцию в сердечнике, Тл; f — рабочая частота, Гц; L_m — средняя длина магнитной линии сердечника, м; A — сечение сердечника, м²; N — количество витков в обмотке нелинейной индуктивности.

Тестовая модель построена на источнике тока, управляемого напряжением (ИТУН), G1, и на источнике напряжения, управляемого током (ИНУТ), H1, который в качестве датчика тока использует независимый источник напряжения V2. Эти управляемые источники используются для измерения и нормирования отображаемых параметров.

Известно, что скорость изменения индукции в сердечнике прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна площади сечения A и виткам обмотки N :

$$dB/dt = U / (A \times N).$$

Следовательно, подав напряжение U на вход интегратора, на его выходе мы получим сигнал, пропорциональный индукции в сердечнике. В нашем случае роль интегратора возложена на узел, состоящий из источника G1 и конденсатора C1. Коэффициент передачи ИТУН G1, обеспечивающий выходное напряжение интегратора, равно индукции, можно вычислить по формуле:

$$K_{G1} = C_1 / (A \times N).$$

Коэффициент передачи ИНУТ H1, обеспечивающий выходное напряжение, равно напряженности в сердечнике нелинейного трансформатора, можно вычислить по формуле:

$$K_{H1} = N / L_m$$

Для расчета коэффициентов используем данные, введенные при помощи директивы .PARAM. В качестве коэффициента передачи ИТУН G1 введем выражение « $\{1\mu / (A \times N)\}$ », ко-

Таблица 4. Относительная длина немагнитного зазора для порошковых сердечников

μ	14	26	40	60	75	90	125	147	160	173	200	300	550
L_g/L_m	0,0714	0,0385	0,025	0,0167	0,0133	0,0111	0,008	0,0068	0,0062	0,0058	0,005	0,0033	0,0018

торое вписывается в строку Value на панели Component Attribute Editor. Эта панель вызывается правым щелчком мыши по символу ИТУН G1 (рис. 7).

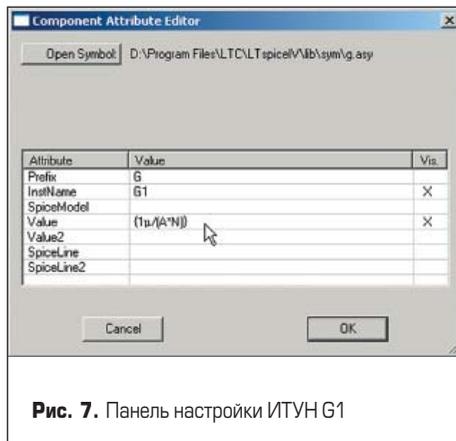


Рис. 7. Панель настройки ИТУН G1

В качестве коэффициента передачи ИНУТ H1 аналогичным образом вводится выражение « $\{N/Lm\}$ ».

Далее настроим независимый источник напряжения V1. Для этого, щелкнув по его символу правой кнопкой мыши, вызовем окно настройки источника Voltage Source. В результате щелчка левой кнопкой мыши по кнопке Advanced появится окно Independent Voltage Source для расширенной настройки независимого источника напряжения V1. В области Functions этого окна выберем функцию источника импульсного напряжения (рис. 8). Заполним настроечные поля источника напряжения в соответствии с табл. 5.

Цикл работы источника импульсного напряжения предусматривает начальное намагничивание сердечника нелинейной индуктивности и формирование замкнутой петли гистерезиса. Директива .tran 0 {1.25/f} {0.25/f} {0.5m/f} автоматически обеспечит отображение замкнутой петли гистерезиса.

Далее вызовем окно настройки нелинейной индуктивности L1, щелкнув правой кнопкой мыши по ее символу (рис. 9). После этого в поле Inductance[H] введем строку:

```
Hc=1000 Bs=1.35 Br=0.5 A={A}
Lm={Lm} Lg={Lm/125} N={N}
```

Параметры модели H_c , B_s и B_r установлены ориентировочно и будут уточняться в процессе настройки.

Перед тем как приступить к подбору параметров перемагничивания, необходимо определить ожидаемые потери в сердечнике нелинейной индуктивности.

Таблица 5. Настройка источника импульсного напряжения

Настроечное поле	Содержимое
Vinitial[V]	{b*A*N*f/0.25}
Von[V]	{-b*A*N*f/0.25}
Tdelay[s]	{0.25/f}
Trise[s]	{0.5m/f}
Tfall[s]	{0.5m/f}
Ton[s]	{{0.5-0.5m}/f}
Tperiod[s]	{1/f}

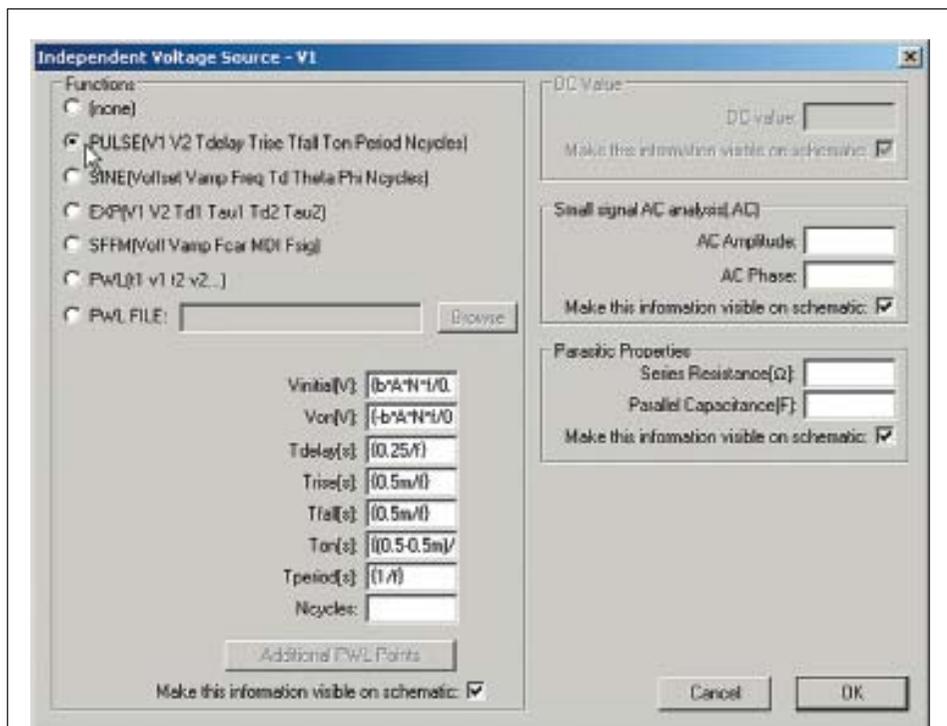


Рис. 8. Настройка независимого источника напряжения V1

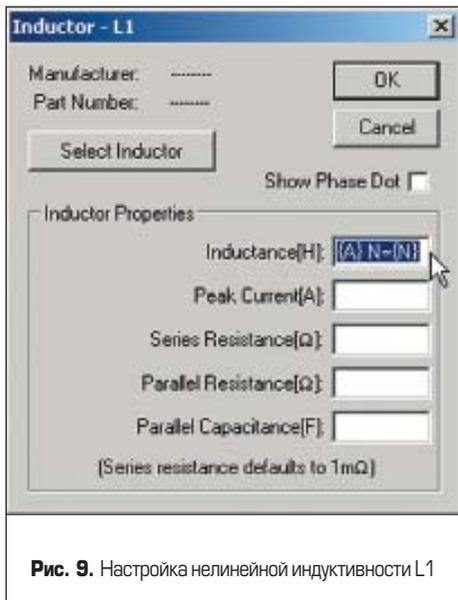


Рис. 9. Настройка нелинейной индуктивности L1

Производитель в справочной документации приводит формулы, позволяющие определить ожидаемые удельные потери P_L . Большим неудобством является то, что в этих формулах также используются единицы СГС. Кроме того, в процессе определения потерь для различных материалов было замечено несоответствие между графиками потерь и формулами, приводимыми в документации Magnetics [2]. Сначала несоответствие было замечено для XFlux, а затем для High Flux с проницаемостью 125. Ориентируясь на графики, поскольку в различных файлах документации они совпадают, удалось получить коэффициенты, обеспечивающие хорошее совпадение аналитических и графических данных. Все формулы приведены в табл.6, где единицы измерения для удобства переведены в систему СИ.

Рассчитаем удельные потери в сердечнике из материала High Flux с проницаемостью $\mu = 125$, для индукции $B = 0,1$ Тл и частоты $F = 100$ кГц:

$$P_L = 56,37 \times B^{2,55} \times F^{1,42} = 56,37 \times 0,1^{2,55} \times 100\,000^{1,42} = 2\,000\,083 \text{ Вт/м}^3.$$

Так как объем сердечника $V_c = 0,0000105 \text{ м}^3$, то потери составят:

$$P_c = P_L \times V_c = 2\,000\,083 \times 0,0000105 = 20,1 \text{ Вт}.$$

На горизонтальном (насыщенном) участке кривой намагничивания для сердечника High Flux с проницаемостью $\mu = 125$ (рис. 2) выберем две точки, одна из которых находится в конце участка ($H_1 = 50\,000 \text{ А/м}$), а другая в начале ($H_2 = 15\,000 \text{ А/м}$). Определим по графику (рис. 2) или рассчитаем по формуле (1) индукцию (Тл), соответствующую каждой точке (2).

$$B_1 = 0,1 \times \left[\frac{0,0532 - 6,81 \times 10^{-4} \times 50000 + 3,51 \times 10^{-6} \times 50000^2}{1 + 1,05 \times 10^{-4} \times 50000 + 1,69 \times 10^{-8} \times 50000^2} \right]^{0,5} = 1,34, \quad (2)$$

$$B_2 = 0,1 \times \left[\frac{0,0532 - 6,81 \times 10^{-4} \times 15000 + 3,51 \times 10^{-6} \times 15000^2}{1 + 1,05 \times 10^{-4} \times 15000 + 1,69 \times 10^{-8} \times 15000^2} \right]^{0,5} = 1,11$$

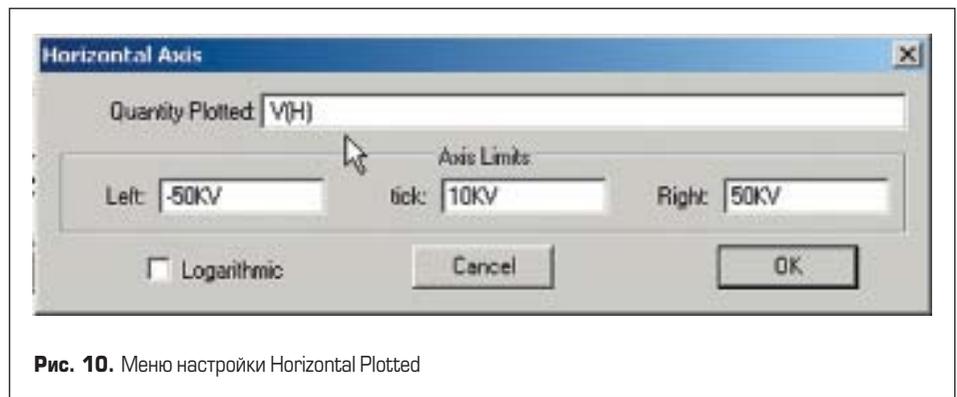


Рис. 10. Меню настройки Horizontal Plotted

Согласно методике настройки гистерезисной модели [4] необходимо совместить крайние точки двух симметричных циклов перемагничивания гистерезисной модели с двумя точками начальной кривой намагничивания сердечника. Кроме того, необходимо обеспечить соответствие потерь перемагничивания гистерезисной модели и сердечника.

Подгонка значения напряженности поля ($H_1 = 50\,000 \text{ А/м}$) для индукции $B_1 = 1,34 \text{ Тл}$

Чтобы найти напряженность, соответствующую текущим настройкам модели, устанавливаем значение пользовательского параметра $b = 1,34$ (максимальная индукция 1,34 Тл) и запускаем процесс моделирования. После завершения моделирования необходимо отобразить общий вид петли гистерезиса для сердечника индуктивности L1.

По умолчанию горизонтальная ось плоттера является временной осью (time). Чтобы перейти к отображению петли гистерезиса, на горизонтальную ось плоттера необходимо вывести выходное напряжение ИНУТ $H_1 \text{ V(H)}$, которое имеет размерность напряженности в сердечнике нелинейной индуктивности. Для этого поместим курсор мыши в область числовой разметки горизонтальной оси и, когда тот превратится в маленькую линейку, щелкнем левой кнопкой мыши. В результате этого действия появится меню настройки горизонтальной оси **Horizontal Axis** (рис. 10), где в поле **Quantity Plotted** (параметр развертки) вместо параметра "time" необходимо вписать «**V(H)**».

По вертикальной оси плоттера выводим напряжение на конденсаторе $V(B)$, которое имеет размерность индукции в сердечнике нелинейной индуктивности. Для этого необходимо совместить курсор мыши с верхним выводом конденсатора и, когда курсор преобразится в «щуп», щелкнуть левой кнопкой мыши.

Результирующий внешний вид предельной петли гистерезиса изображен на рис. 11.

Если в крайних точках петли гистерезиса абсолютное значение напряженности поля меньше требуемой, то следует уменьшить значение B_s . Если же напряженность поля больше, то значение B_s следует увеличить. Моделирование повторять до тех пор, пока не будет достигнуто удовлетворительное соответствие.

Подгонка значения напряженности поля ($H_2 = 15\,000 \text{ А/м}$) для индукции $B_2 = 1,11 \text{ Тл}$

Чтобы найти напряженность, соответствующую текущим настройкам модели, устанавливаем значение пользовательского параметра $b = 1,11$ (максимальная индукция 1,11 Тл) и запускаем процесс моделирования. Результирующий внешний вид петли гистерезиса изображен на рис. 12.

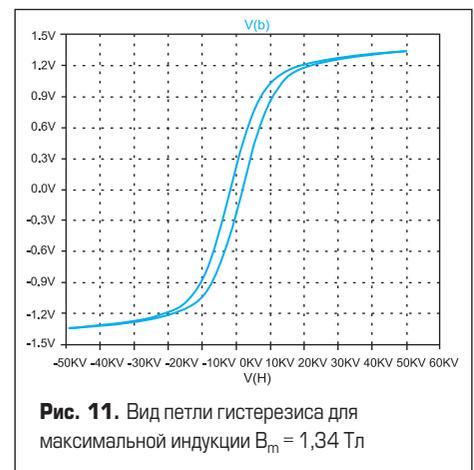


Рис. 11. Вид петли гистерезиса для максимальной индукции $B_m = 1,34 \text{ Тл}$

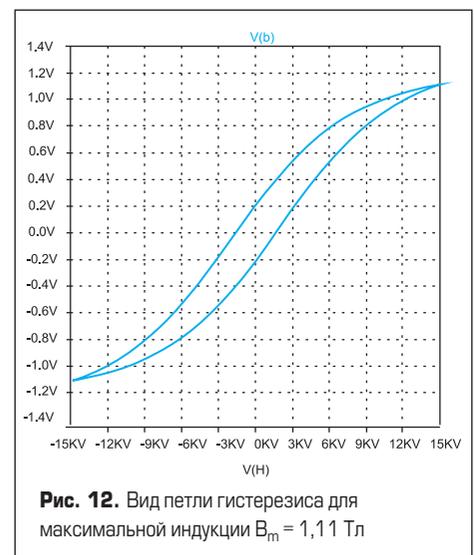


Рис. 12. Вид петли гистерезиса для максимальной индукции $B_m = 1,11 \text{ Тл}$

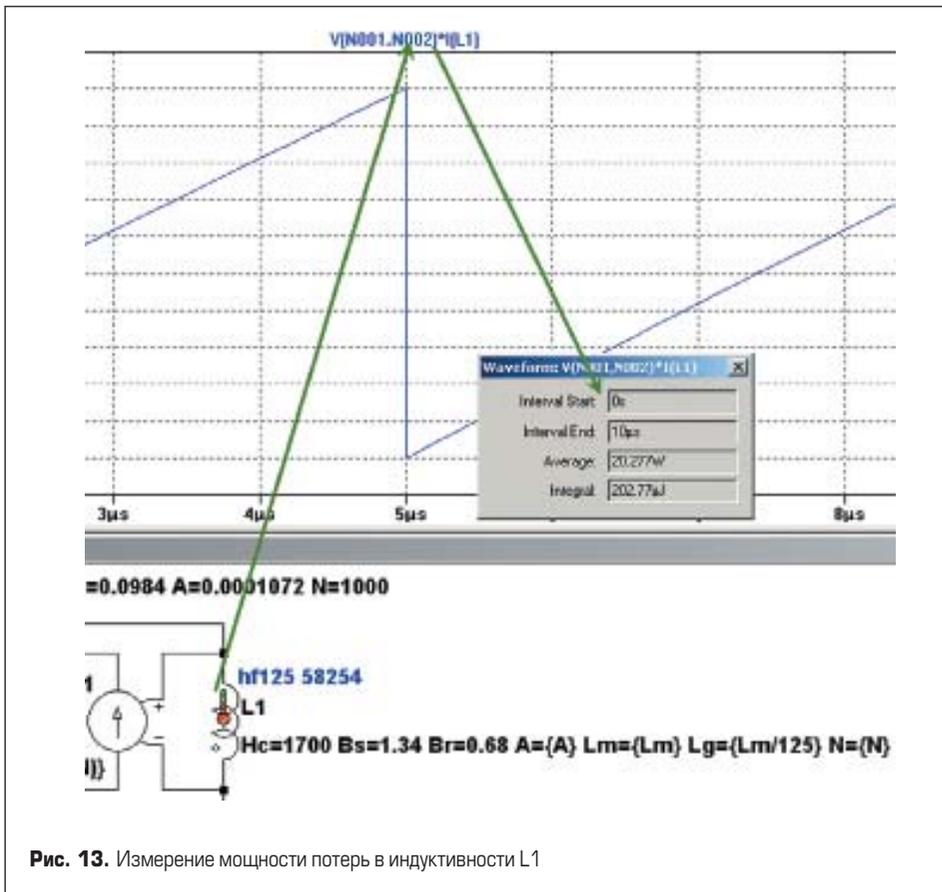


Рис. 13. Измерение мощности потерь в индуктивности L1

Если в крайних точках петли гистерезиса абсолютное значение напряженности поля меньше требуемого, то следует уменьшить значение B_s , и наоборот. Повторять подгонку до тех пор, пока не будет достигнуто удовлетворительное соответствие.

Подгонка уровня потерь в сердечнике до требуемого значения

$P_c = 20,1$ Вт при индукции $B = 0,1$ Тл

Чтобы найти потери, соответствующие текущим настройкам модели, устанавливаем значение пользовательского параметра $b = 0,1$ (максимальная индукция 0,1 Тл) и запускаем процесс моделирования. После завершения моделирования выводим график потерь

в индуктивности L1. Для этого необходимо навести курсор мыши на символ индуктивности, нажав <Alt>. После того как курсор трансформируется в «градусник», необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши. В результате в окно плоттера будет выведен график мгновенной мощности « $V(N001,N002)*I(L1)$ » на индуктивности L1. Чтобы вычислить среднюю мощность, необходимо нажать <Ctrl> и щелкнуть левой кнопкой мыши по формуле графика в верхней части окна плоттера (рис. 13).

Если мощность потерь больше требуемой, то необходимо уменьшить значение H_c и, соответственно, увеличить H_s , если мощность потерь меньше. Моделирование повторять

до тех пор, пока не будет достигнуто удовлетворительное соответствие. После завершения этого этапа необходимо уточнить значение B_s , выполнив второй пункт методики настройки. Затем повторить подборку параметров, начиная с первого пункта. Это следует делать до тех пор, когда полученные потери и параметры намагничивания не придут в соответствие с требуемыми.

В данном случае подборка параметров модели велась для частоты 100 кГц. Однако при снижении частоты модель пропорционально снижает потери, что позволяет использовать ее в диапазоне частот 30–100 кГц. Строки настройки модели для наиболее популярных порошковых материалов:

- XFlux ($\mu = 60$)[^]
 $H_c=2040 B_s=1,525 B_r=0,655 A=\{A\} L_m=\{L_m\} L_g=\{L_m/60\} N=\{N\};$

- High Flux ($\mu = 125$)[^]
 $H_c=1700 B_s=1,34 B_r=0,68 A=\{A\} L_m=\{L_m\} L_g=\{L_m/125\} N=\{N\};$

- High Flux ($\mu = 60$)[^]
 $H_c=890 B_s=1,223 B_r=0,217 A=\{A\} L_m=\{L_m\} L_g=\{L_m/60\} N=\{N\}.$

Из настроек для аналогичных материалов видно, что при снижении проницаемости снижается и значение насыщения индукции B_s . Оно и понятно, ведь порошки изотропны. И если при снижении проницаемости уменьшается содержание магнитного материала вдоль магнитной силовой линии, то аналогичным образом снижается и объемное содержание порошка, что приводит к уменьшению заполнения сечения сердечника и снижению максимальной индукции.

Использование симулятора LTspice в процессе расчета дросселя с порошковым сердечником

Индуктивность дросселя с порошковым сердечником сильно зависит от величины тока подмагничивания. Поэтому в процессе расчета обычно требуется подгонять обмоточные данные дросселя, чтобы получить необходимую индуктивность при заданном токе подмагничивания. Процедуру подгонки можно ускорить и сделать ее более показательной и комфортной, если для этой цели использовать симулятор LTspice.

В качестве примера рассчитаем дроссель индуктивностью 0,1 мГн, работающий в цепях импульсного тока частотой 33 кГц. При этом амплитуда тока $I_A = 3,5$ А, а действующее значение $I_D = 0,8$ А.

Так как через обмотку дросселя протекает ток с большой амплитудной составляющей, то остановим свой выбор на сердечнике из Мо-пермаллоя (МРР), имеющего минимальный уровень потерь перемагничивания. Воспользуемся графоаналитической методикой подбора порошкового сердечника, предлагаемой в документации производи-

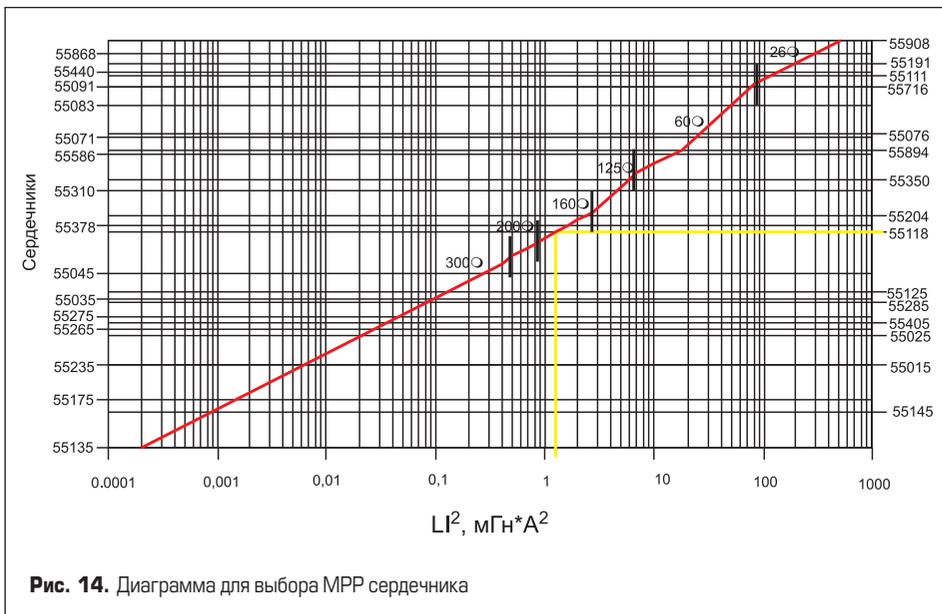


Рис. 14. Диаграмма для выбора МРР сердечника

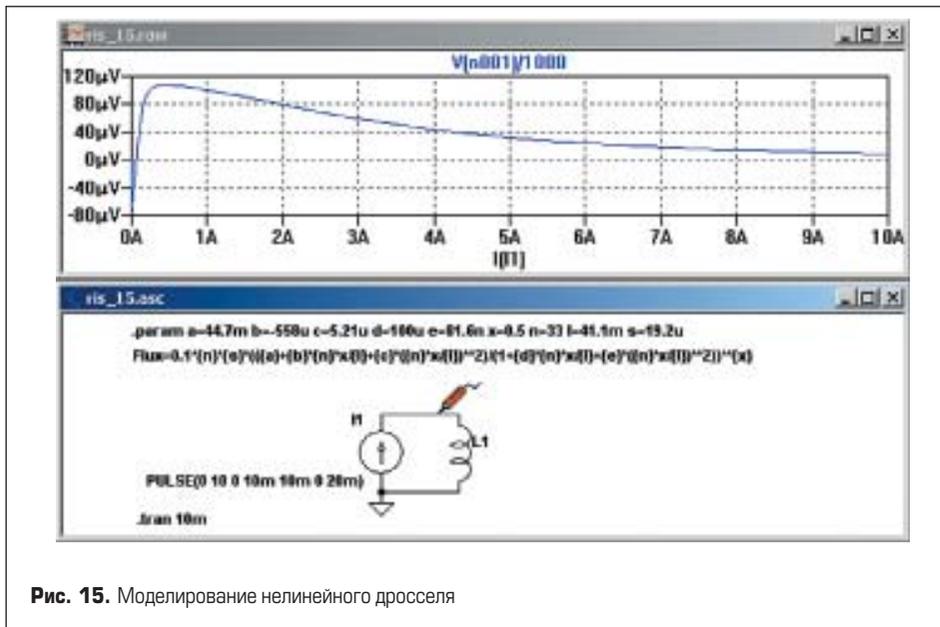


Рис. 15. Моделирование нелинейного дросселя

теля [2]. Согласно методике, сначала нужно определить величину $I_A^2 \times L = 3,5^2 \times 0,1 = 1,225$ мГн·А², характеризующую энергию, запасаемую в индуктивности дросселя. Для выбора сердечника воспользуемся диаграммой на рис. 14.

Требуемую энергию способен запасть сердечник № 55118, имеющий проницаемость $\mu = 160$ и индуктивность одного витка $A_L = 92$ нГн. Кроме того, сердечник имеет следующие конструктивные размеры:

- внешний диаметр OD (макс.) — 17,4 мм;
- внутренний диаметр ID (мин.) — 9,53 мм;
- высота HT (макс.) — 7,11 мм;
- сечение окна $S_o = 0,713$ см²;
- сечение сердечника $S_c = 0,192$ см²;

- средняя длина магнитной силовой линии $L_m = 41,1$ мм;
- объем $V = 789 \times 10^{-9}$ м³.

Определим количество витков: $W = \sqrt{L/A_L} = \sqrt{(0,1 \times 10^{-3}) / (92 \times 10^9)} = 33$.

На рис. 15 приведен пример моделирования нелинейного дросселя, намотанного на тороидальном сердечнике № 55118 из Мо-пермаллоя (МРР) с проницаемостью 160. На сердечник намотана обмотка $N = 33$ витка.

Для ввода коэффициентов аналитической зависимости и параметров сердечника используем директиву **.PARAM**:

```
.param a=44.7m b=-558u c=5.21u d=100u e=81.6n
x=0.5 n=33 l=41.1m s=19.2u
```

Индуктивность нелинейного дросселя задается выражением:

$$Flux=0.1*(n)**s*((a)+(b)*(n)**x/(l))+c*((n)*x/(l))**2)/(1+(d)*(n)*x/(l)+e*((n)*x/(l))**2)**x$$

Моделирование показывает, что выбранный сердечник не способен обеспечить индуктивность 0,1 мГн при токе 3,5 А. Увеличение количества витков до 100 также не спасает ситуацию. При этом сердечник насыщается, и индуктивность даже падает. Гораздо лучшие результаты удастся получить с сердечником № 55122, имеющим проницаемость $\mu = 26$ и индуктивность одного витка $A_L = 15$ нГн. Этот сердечник имеет тот же размер, что и № 55118. Определим количество витков для нового сердечника: $W = \sqrt{(0,1 \times 10^{-3}) / (15 \times 10^9)} = 82$. Пример моделирования дросселя с сердечником 55122 приведен на рис. 5. Моделирование показывает, что индуктивность 0,1 мГн, при токе 3,5 А, обеспечивается обмоткой, содержащей 90 витков.

Литература

1. <http://www.mag-inc.com/>
2. http://www.maginc.com/File%20Library/Product%20Literature/Powder%20Core%20Literature/2008_PowderCoreCatalog.pdf
3. Chan J. H., Vladimirescu A., Gao X. C., Liebmann P., Valainis J. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation. Ieee Transactions On Computer-Aided Design. Vol. 10. 1991. № 4.
4. Володин В. Я. Гистерезисная модель нелинейной индуктивности симулятора LTspice // Силовая электроника. 2010. № 1.