

# Моделирование индуктивностей с порошковыми сердечниками

## при помощи симулятора LTspice

Валентин Володин

valvolodin@narod.ru

**П**орошковые 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  $\Psi$ , индуктивностью  $L$  и током  $I$ , протекающим через катушку индуктивности. В свою очередь, потокосцепление равно произведению магнитного потока  $\Phi$  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  $S = 0,192$  см<sup>2</sup>. На сердечник намотана обмотка  $N = 90$  витка.

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

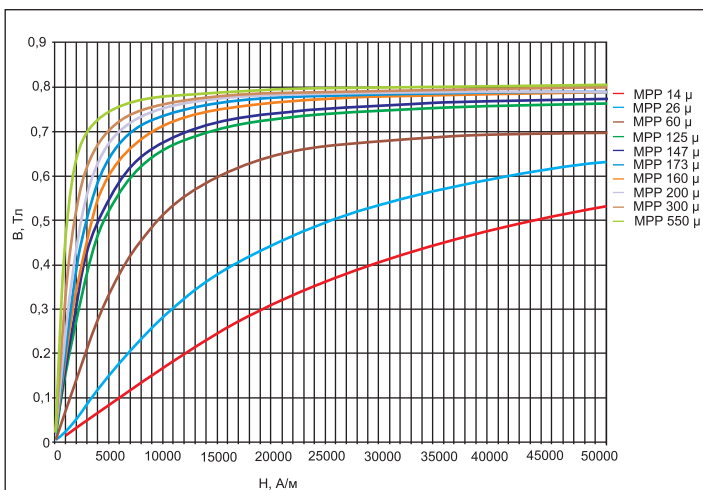
```
.param a=211.2m b=349u c=-3.59n
d=111u e=-1.23n x=2 n=90 l=41.1m s=19.2u
```

Индуктивность нелинейного дросселя задается выражением:

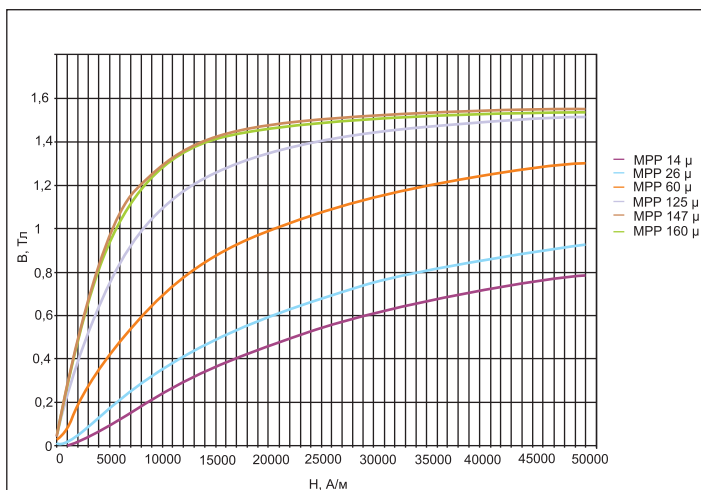
$$\text{Flux} = 0.1 * \{n\} * \{s\} * ((\{a\} + \{b\} * \{n\} * x / \{l\} + \{c\} * (\{n\} * x / \{l\}) ** 2) / (1 + \{d\} * \{n\} * x / \{l\} + \{e\} * (\{n\} * x / \{l\}) ** 2)) ** \{x\}$$

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

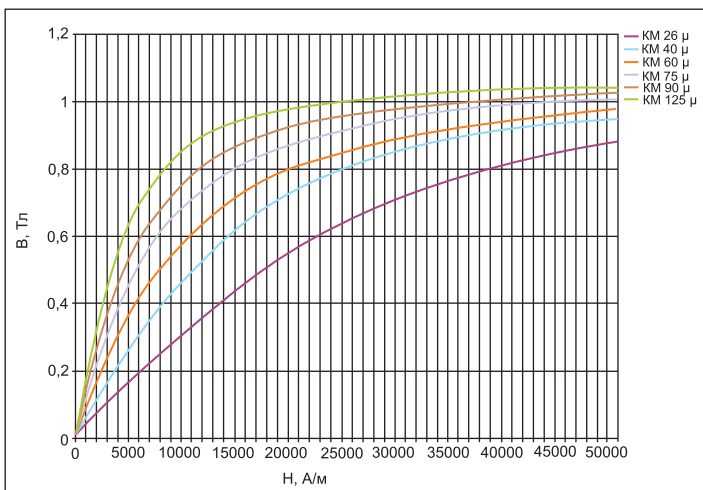
a	b	c	d	e	x	μ	Тип материала
-23,74	0,208	1,46·10 <sup>-4</sup>	0,778	4,99·10 <sup>-5</sup>	2	14	MPP
0,2112	3,49·10 <sup>-4</sup>	-3,59·10 <sup>-9</sup>	1,11·10 <sup>-4</sup>	-1,23·10 <sup>-9</sup>	2	26	
0,2576	7,41·10 <sup>-4</sup>	1,91·10 <sup>-8</sup>	2,48·10 <sup>-4</sup>	7,55·10 <sup>-9</sup>	2	60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



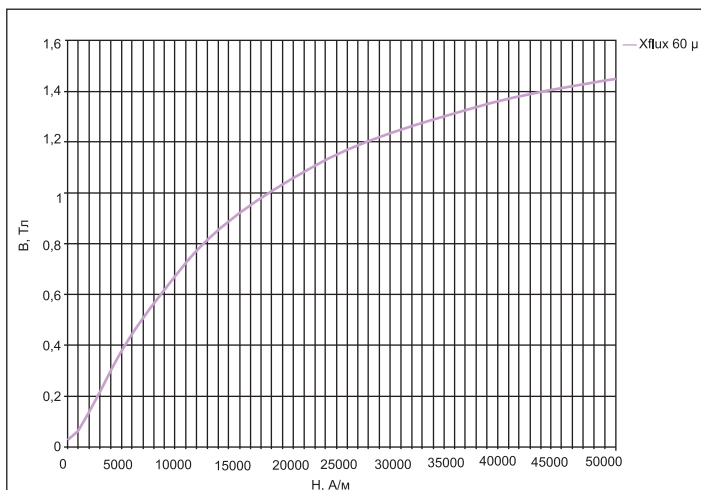
**Рис. 1.** Кривые намагничивания для порошковых сердечников на основе MPP



**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

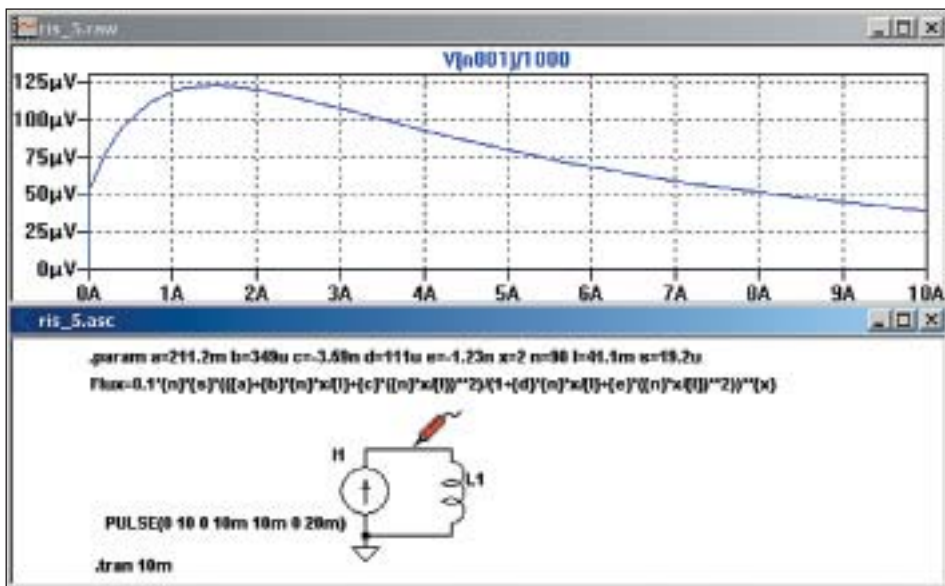


Рис. 5. Задание нелинейной индуктивности с помощью выражения

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	Коэрцитивная 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 <sup>2</sup>	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 порошковом 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  $A = 107,2$  мм<sup>2</sup> = 0,0001072 м<sup>2</sup>;
- средняя длина магнитной линии  $L_m = 9,84$  см = 0,0984 м;
- объем  $V_c = 10,5$  см<sup>3</sup> = 0,0000105 м<sup>3</sup>.

Длину немагнитного зазора можно вычислить, исходя из начальной проницаемости  $\mu$  магнитного материала, которая показывает,

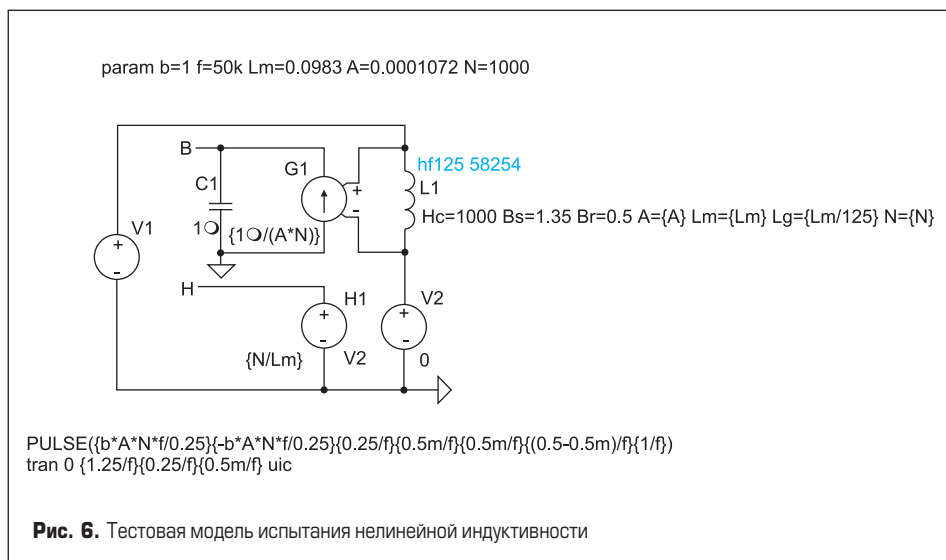


Рис. 6. Тестовая модель испытания нелинейной индуктивности

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, м<sup>2</sup>;  $N$  — 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

$\mu$	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).

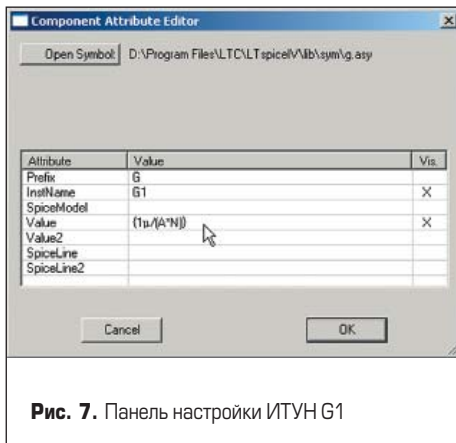


Рис. 7. Панель настройки ИТУН G1

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}

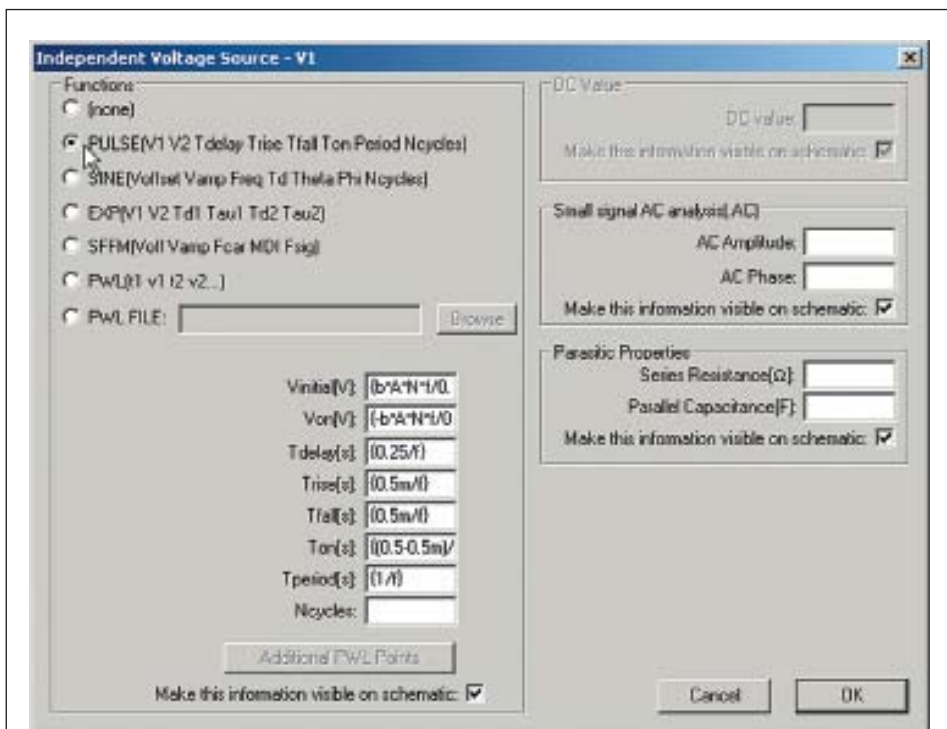


Рис. 8. Настройка независимого источника напряжения V1



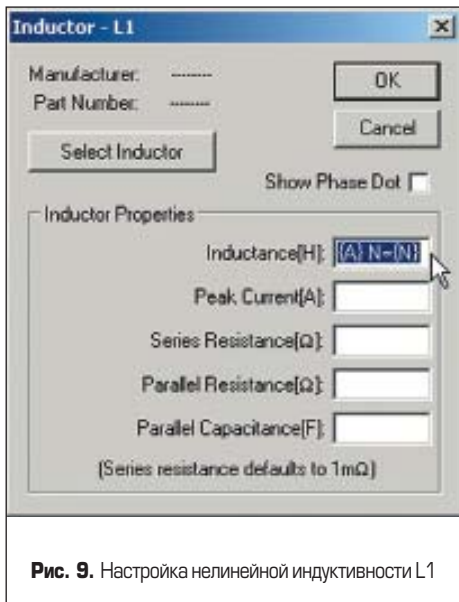


Рис. 9. Настройка нелинейной индуктивности L1

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).

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

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

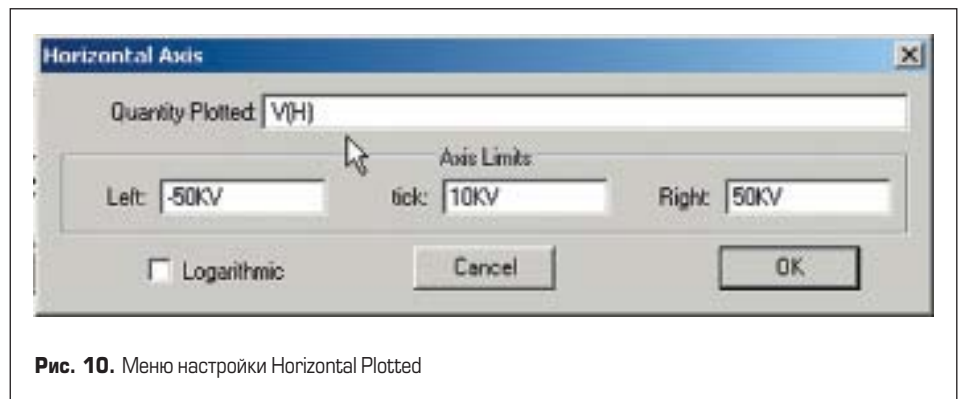


Рис. 10. Меню настройки Horizontal Plotted

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.

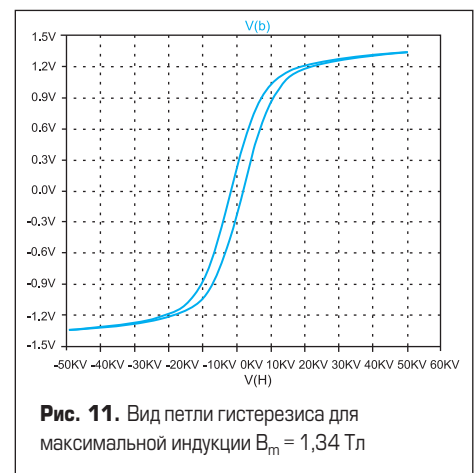


Рис. 11. Вид петли гистерезиса для максимальной индукции  $B_m = 1,34 \text{ Тл}$

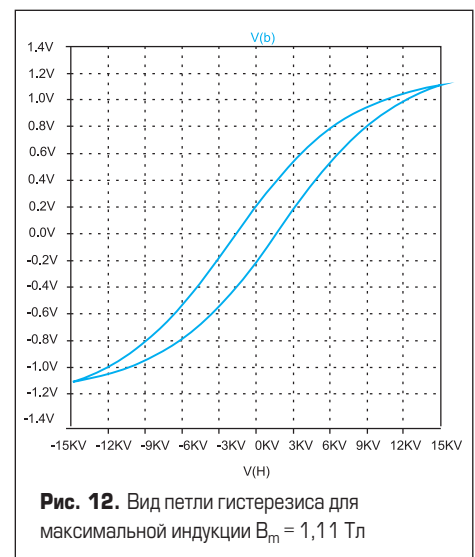


Рис. 12. Вид петли гистерезиса для максимальной индукции  $B_m = 1,11 \text{ Тл}$

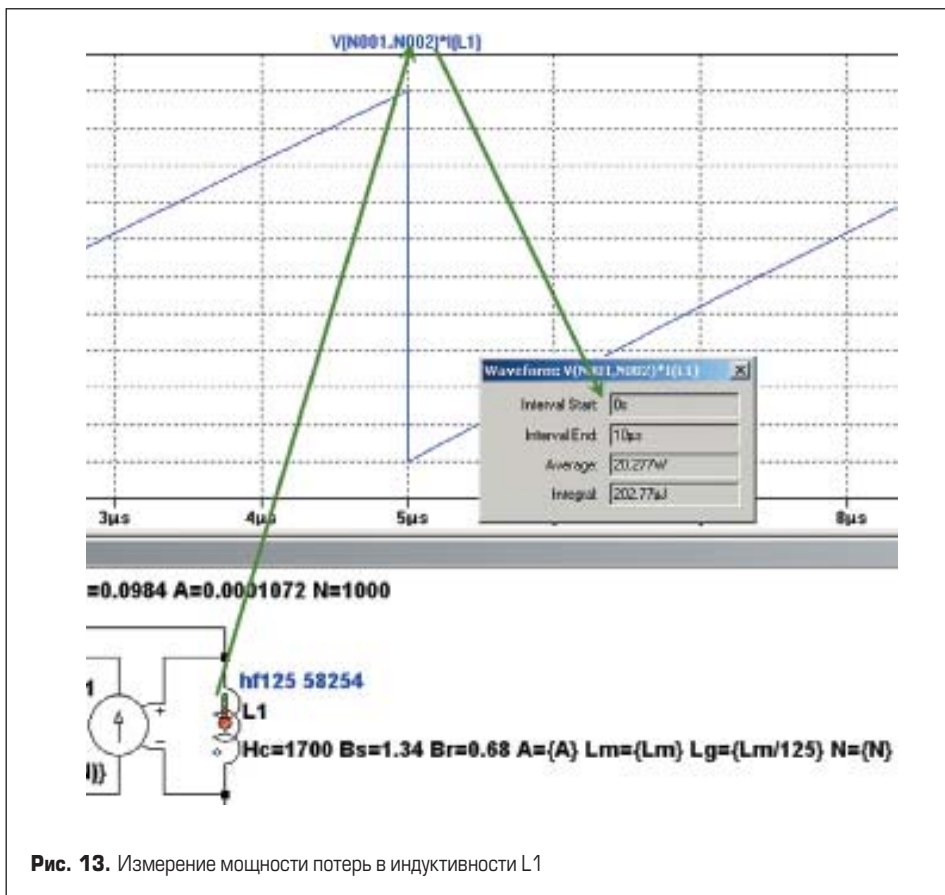


Рис. 13. Измерение мощности потерь в индуктивности L1

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

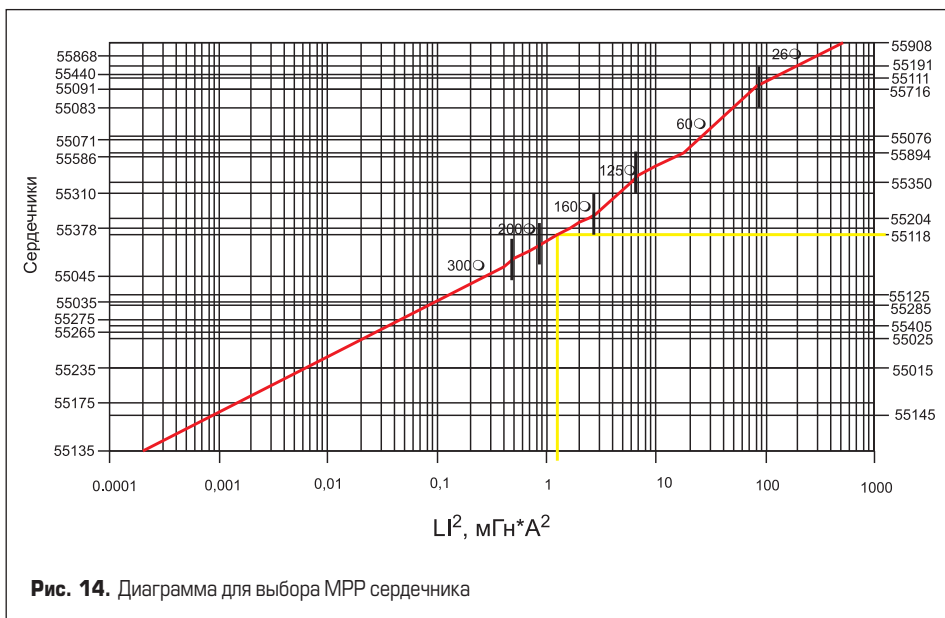


Рис. 14. Диаграмма для выбора MPP сердечника

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 ( $\mu = 60$ )<sup>^</sup>

$$H_c=2040 \quad B_s=1.525 \quad B_r=0.655 \quad A=\{A\} \quad L_m=\{L_m\} \quad L_g=\{L_m/60\} \quad N=\{N\};$$

- High Flux ( $\mu = 125$ )<sup>^</sup>

$$H_c=1700 \quad B_s=1.34 \quad B_r=0.68 \quad A=\{A\} \quad L_m=\{L_m\} \quad L_g=\{L_m/125\} \quad N=\{N\};$$

- High Flux ( $\mu = 60$ )<sup>^</sup>

$$H_c=890 \quad B_s=1.223 \quad B_r=0.217 \quad A=\{A\} \quad L_m=\{L_m\} \quad L_g=\{L_m/60\} \quad N=\{N\}.$$

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-

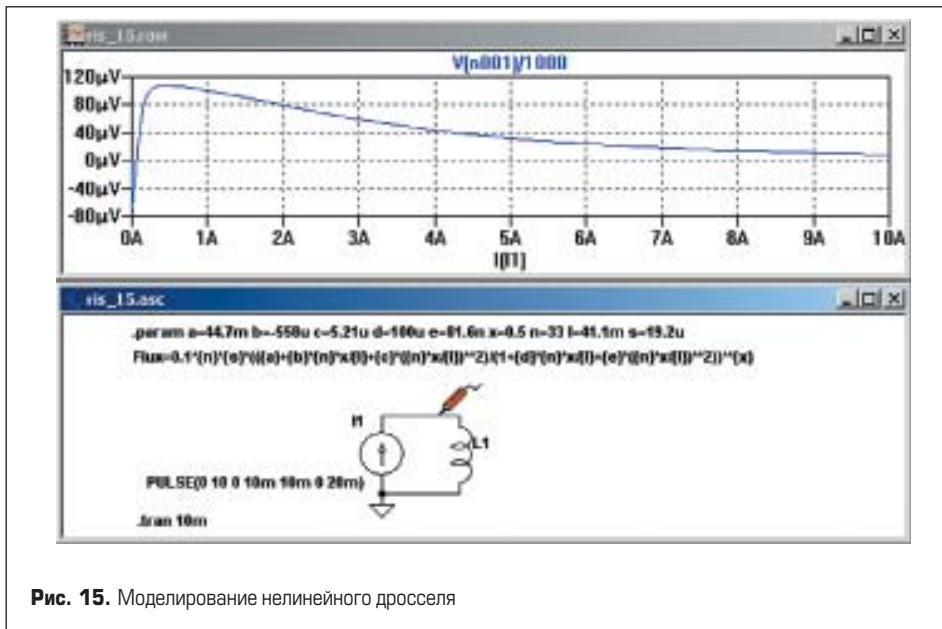


Рис. 15. Моделирование нелинейного дросселя

теля [2]. Согласно методике, сначала нужно определить величину  $I_A^2 \times L = 3,5^2 \times 0,1 = 1,225 \text{ мГн} \cdot \text{А}^2$ , 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  $A_L = 92 \text{ нГн}$ . 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  $S_o = 0,713 \text{ см}^2$ ;
- сечение сердечника  $S_c = 0,192 \text{ см}^2$ ;

- средняя длина магнитной силовой линии  $L_m = 41,1 \text{ мм}$ ;
- объем  $V = 789 \times 10^{-9} \text{ м}^3$ .

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:

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

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  $A_L = 15 \text{ нГн}$ . 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](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.