

В LTSpice предусмотрено два способа задания нелинейности индуктивности.

Первый способ использует аналитическую зависимость:

$$\Psi = L \cdot I$$

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 (рис.3.43) нужно ввести выражение, связывающее потокосцепление, обозначаемое ключевым словом "Flux", и тока, для обозначения которого используется символ "x". В следующем примере описанным способом создаётся линейная индуктивность величиной 1Гн.

Пример:

L1 N001 0 Flux=x

Рассматриваемый способ может оказаться полезным, если известны зависимости, связывающие магнитную индукцию B с напряжённостью магнитного поля H .

Подобные зависимости, например, можно обнаружить в справочной документации компании MAGNETICS [<http://www.mag-inc.com/>], производящей ферритовые и порошковые магнитные сердечники. Сердечники из порошковых магнитных материалов, благодаря наличию внутреннего распределённого немагнитного зазора, нашли широкое применения в индуктивностях и трансформаторах импульсных преобразователей, работающих с подмагничиванием. Техническая информация на порошковые магнитные материалы приводится в документации [<http://www.mag-inc.com/powder/Technical%20Data%20PowderCoreCatalog.pdf>]. Здесь же можно найти аналитическое выражение, описывающее процесс перемагничивания материала в области положительной индукции и напряжённости магнитного поля:

$$B = \left[\frac{a + b \cdot H + c \cdot H^2}{1 + d \cdot H + e \cdot H^2} \right]^x, \text{ кГс}$$

Следует иметь в виду, что в оригинальной документации используются единицы измерения системы СГС. Здесь индукция измеряется в кГс (10 кГс=1 Тл), а напряжённость магнитного поля в Эрстедах (1 А/м = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-3}$ = 0.012566 Э). Далее, для перехода к системе СИ, придётся использовать соответствующие нормирующие коэффициенты:

$$B = 0.1 \cdot \left[\frac{a + b \cdot 0.012566 \cdot H + c \cdot (0.012566 \cdot H)^2}{1 + d \cdot 0.012566 \cdot H + e \cdot (0.012566 \cdot H)^2} \right]^x, \text{ Тл}$$

Коэффициенты аналитического выражения, соответствующие альсиферам (Kool Mu) с различной проницаемостью, перечислены в таблице 3.14.

Таблица 3.14. Коэффициенты аналитической зависимости напряжённости и индукции альсифера (Kool Mu)

Проницаемость	a	b	c	d	e	x
26	5.868E-3	7.450E-3	5.706E-4	-2.930E-4	5.539E-6	0.5
40	8.870E-3	4.450E-3	1.710E-3	2.330E-4	1.630E-5	0.5
60	1.658E-2	1.831E-3	4.621E-3	4.700E-3	3.833E-5	0.5
75	1.433E-2	7.738E-3	8.376E-3	5.773E-3	7.159E-5	0.5
90	5.660E-2	-9.675E-3	1.250E-2	5.792E-3	1.075E-4	0.5
125	7.808E-3	4.049E-2	1.643E-2	3.121E-3	1.447E-4	0.5

На **рис. 3.44** приведен пример моделирования нелинейного дросселя, намотанного на тороидальном сердечнике 77083A7из альсифера с проницаемостью 60. Сердечник имеет среднюю длину магнитной силовой линии $L=9.84$ см и сечение $S=1.072$ см². На сердечник намотана обмотка $W=220$ витков.

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

.param a=16.58m b=1.831m c=4.621m d=4.7m e=38.33u x=0.5 w=220 l=98.4m s=107.2u

Индуктивность нелинейного дросселя задаётся выражением:

$$\text{Flux} = 0.1 * \{w\} * \{s\} * ((\{a\} + \{b\} * 0.012566 * \{w\} * \{x\} / \{l\} + \{c\} * (0.012566 * \{w\} * \{x\} / \{l\}) ** 2) / (1 + \{d\} * 0.012566 * \{w\} * \{x\} / \{l\} + \{e\} * (0.012566 * \{w\} * \{x\} / \{l\}) ** 2)) ** \{x\}$$

Результирующее текстовое описание схемы примера должно выглядеть следующим образом:

```

* C:\Program Files\LTC\SwCADIII\test_L1.asc
L1 N001 0 Flux=0.1*{w}*{s}*({a}+{b}*0.012566*{w}*x/{l}+{c}*(0.012566*{w}*x/{l})**2)/(1+
{d}*0.012566*{w}*x/{l}+{e}*(0.012566*{w}*x/{l})**2)**{x}
I1 0 N001 PULSE(0 10 0 10m 10m 0 20m)
.param a=16.58m b=1.831m c=4.621m d=4.7m e=38.33u x=0.5 w=220 l=98.4m s=107.2u
.tran 10m
.backanno
.end

```

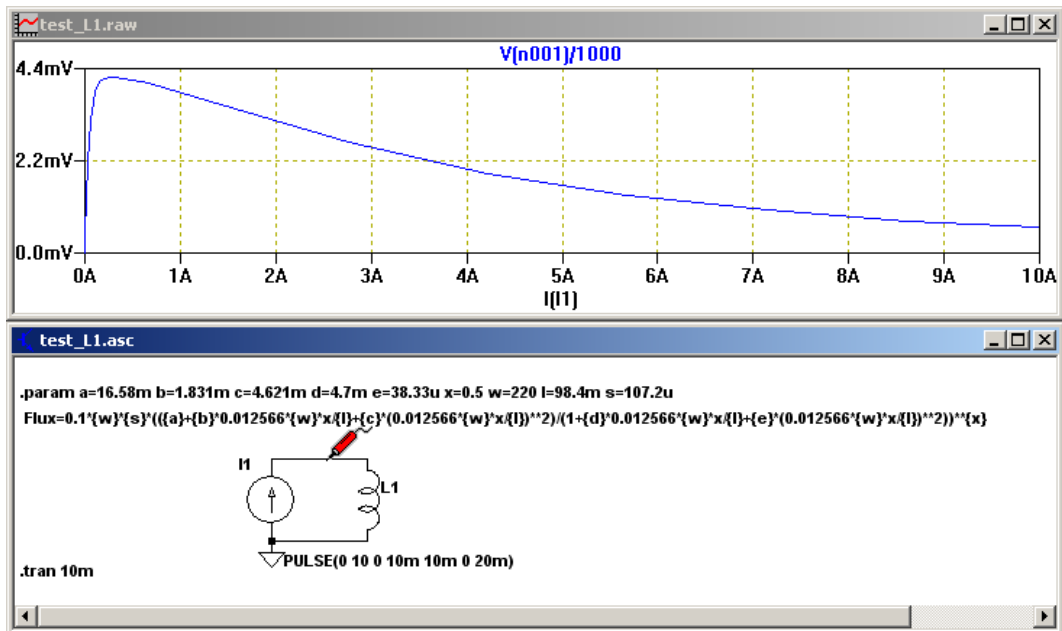


Рис. 3.44. Задание нелинейной индуктивности с помощью выражения

Целью моделирования является исследование зависимости индуктивности нелинейного дросселя от тока, протекающего через его обмотку. Для этого, с помощью источника напряжения V1, через обмотку дросселя пропускается ток, линейно нарастающий со скоростью 1000А в секунду. В этом случае напряжение на дросселе будет пропорционально его индуктивности. Чтобы величина этого напряжения численно равнялась текущей индуктивности, его необходимо уменьшить в 1000 раз.

По результатам моделирования видно, что индуктивность дросселя минимальна в области малых токов, затем резко возрастает до максимального значения 4.2 мГн, при токе 0.2А, и далее плавно снижается по мере нарастания тока.