

Вступление

Автор статьи делится опытом моделирования трансформаторов и индукторов, имеющих сложные сердечники, средствами бесплатного spice симулятора SwCad. Описанная в статье методика не ориентирована на специфические особенности SwCad и поэтому может быть использована и в других подобных симуляторах.

1. Моделирование магнитных компонентов с ферромагнитным сердечником в SwCad

Практически все известные виды вторичных источников питания содержат в своём составе электромагнитные компоненты, такие как трансформаторы и индукторы. Обычно эти компоненты изготавливаются с использованием различных ферромагнитных материалов, позволяющих улучшить их электрические параметры, а так же уменьшить размеры и массу. Для моделирование этих компонентов практически во всех более или менее серьёзных симуляторах есть библиотечные модели, позволяющие моделировать трансформаторы и дроссели с простыми магнитопроводами, имеющими немагнитный зазор и обладающими нелинейностью типа гистерезис и насыщение. Условимся называть простым магнитопровод, имеющий одинаковый магнитный состав и сечение по всей своей длине.

В spice симуляторах, для моделирования ферромагнитных сердечников, наиболее часто используется модель Джилса-Атертона.

В SwCad используется упрощённая гистерезисную модель магнитного сердечника, которую в 1991 году предложил Джон Чан[1]. Модель использует только основные параметры петли гистерезиса, перечисленные в таблице 3.3 и показанные на рис.1.

Таблица 3.3

Параметр	Описание	Единицы измерения
Hc	Коэрцитивная сила	A/м
B _r	Остаточная индукция	Tл
B _s	Индукция насыщения	Tл

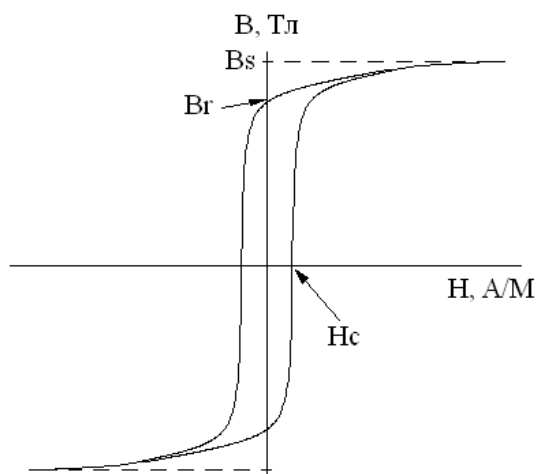


Рис.1 Параметры петли гистерезиса магнитного материала.

Наряду с параметрами петли гистерезиса, при описании нелинейной индуктивности, учитываются линейные размеры сердечника, а так же количество витков катушки (таблица 3.4).

Таблица 3.4

Параметр	Описание	Единицы измерения
Lm	Средняя длина магнитной линии (исключая немагнитный зазор)	м
Lg	Длина немагнитного зазора	м
A	Сечение сердечника	м ²
N	Количество витков	-

Согласитесь со мной, что способ задания нелинейной индуктивности, используемый в SwCad, более привлекателен, т.к. при описании сердечника использует доступные справочные данные, а так же понятные и

легко контролируемые параметры самого сердечника и катушки.

Сравнение результатов моделирования с практическими результатами показало высокую достоверность используемой модели, которая в некоторых случаях даже превосходит достоверность модели Джилса-Атертона.

2. Существующие способы моделирования сложных сердечников.

Что касается сложных сердечников, имеющих разветвлённые или неоднородные магнитопроводы, то обычно для их моделирования используют принцип подобия, согласно которому к расчёту магнитных цепей применимы все приёмы расчёта электрических цепей с нелинейными сопротивлениями [2]. Аналогом тока в электрической цепи является поток в магнитной цепи. Аналогом ЭДС, является магнитодвижущая сила – МДС. Некоторые симуляторы, таких как SIMPLORER, используют именно этот принцип для моделирования разветвлённых магнитных цепей. Для этого в библиотеке симулятора есть соответствующие элементы, такие как источник магнито-движущей силы (MMF), источник магнитного потока (FLUX), магниторезистор (RMAG), обмотка (ELTOMAG) и т.д. И всё же, если вам понадобилось создать модель сложного трансформатора или дросселя, то можете пока не торопиться с покупкой и изучением достаточно дорогого и сложного симулятора. С достаточной для практики точностью подобное моделирование можно произвести и в полюбившемся нам SWCad. Для создания реалистичной модели разветвлённого магнитопровода нам будет достаточно всего лишь его модели нелинейного дросселя.

Обычно разветвлённый магнитопровод представляет из себя комбинацию последовательных и параллельных участков, имеющих различную длину и сечение. Если определится с принципами моделирования этих участков, то создание модели можно буквально механизировать.

3. Связь между магнитными и электрическими величинами

Работа любого электромагнитного элемента связана с законом электромагнитной индукции. Считается, что электромагнитная индукция была впервые обнаружена английским физиком Майклом Фарадеем в 1931 году. Суть этого явления заключается в том, что всякое изменение, в течении времени t , магнитного потока $\Delta \Phi$, пронизывающего обмотку ϖ , независимо от причины вызвавшей изменение потока, наведёт в обмотке электродвижущую силу E [3]:

$$E = \frac{\varpi \cdot \Delta \Phi}{t} \quad (1)$$

Т.е. магнитный поток имеет вольт-секундную зависимость и его изменение зависит только от количества витков обмотки, намотанной поверх сердечника, и времени в течении которого к этой обмотке приложено напряжение. Материал сердечника, а так же его длина и сечение не оказывают какого-то влияния на изменение потока.

Магнитные свойства ферромагнитных материалов зависят от плотности магнитного потока проходящего через них. Общепринятое название плотности магнитного потока – магнитная индукция. Магнитную индукцию можно определить по формуле:

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (2)$$

Где S -площадь, через которую проходит магнитный поток Φ .

Для ферромагнитных материалов обычно снимаются экспериментальные кривые намагничивания, которые устанавливают связь между магнитной индукцией B и напряжённостью магнитного поля H , в различных условиях эксплуатации.

Для создания напряжённости магнитного поля, к участку магнитной цепи надо приложить магнитодвижущую силу. Если известно количество витков обмотки ϖ , намотанной поверх сердечника, а так же ток, протекающий через эту обмотку, то магнитодвижущую силу можно определить по формуле:

$$F = I \cdot \varpi \quad (3)$$

Напряжённость магнитного поля в ферромагнитном сердечнике можно определить по формуле:

$$H = \frac{F}{l_c}, \quad (4)$$

Где l_c - длина магнитной силовой линии.

Как уже говорилось выше, магнитные цепи подчиняются закону Ома для магнитных цепей. Следовательно магнитный поток в сердечнике связан с магнитодвижущей силой через магнитное сопротивление:

$$R_m = \frac{F}{\Phi} = \frac{I \cdot \varpi}{S \cdot B} \quad (5)$$

4. Моделирование магнитных цепей, работающих в переменном поле

Сначала рассмотрим принципы моделирования магнитных цепей для случая переменного поля, в котором отсутствует постоянная (подмагничивающая) составляющая и текущее значение индукции Φ определяется её

приращением, согласно закона об электромагнитной индукции (1).

4.1 Моделирование последовательных участков магнитной цепи

Представим себе некую магнитную цепь, состоящую из k (в данном случае $k=4$), включенных последовательно, фрагментов, имеющих различную длину и сечение (рис.2).

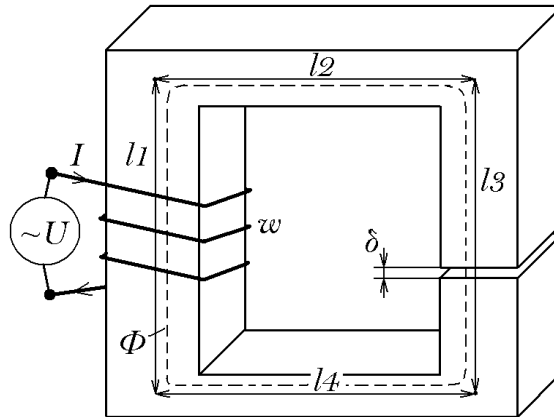


Рис.2 Пример последовательно магнитной цепи

Попробуем эту последовательную цепь моделировать с помощью k отдельных нелинейных дросселей, каждый из которых соответствует определённому фрагменту магнитной цепи, т.е. имеет соответствующую длину, сечение и материал магнитопровода. Так как цепь не разветвлённая, то через неё протекает один и тот же поток Φ . Возникает вопрос, как создать одинаковый поток в независимых нелинейных дросселях? В решении этой задачи нам поможет тот же закон электромагнитной индукции, согласно которому мы можем получить равный поток в различных магнитопроводах, если намотаем на них обмотки с равным количеством витков и соединим эти обмотки параллельно.

Теперь, обеспечив равенство потоков, решим проблему корректного моделирования намагничивающего тока.

На каждом из участков различного сечения поток Φ вызывает различную индукцию:

$$B_k = \frac{\Phi}{S_k} \quad (6)$$

В свою очередь магнитная индукция B_k , через кривую намагничивания конкретного фрагмента, связана с напряжённостью магнитного поля H_k внутри фрагмента магнитопровода. Зная напряжённость магнитного поля и длину фрагмента, можно найти магнитное напряжение $H_k \cdot l_k = F_k$, которое прикладывается к каждому из фрагментов. Так как фрагменты магнитопровода включены последовательно, то общее магнитное напряжение будет равно сумме напряжений, требуемых для создания потока в каждом фрагменте:

$$\sum F_k = F \quad (7)$$

Ввиду того, что токи намагничивания отдельных фрагментов суммируются, то это позволяет моделировать их при помощи той же модели, которая моделирует равные потоки, и где отдельные фрагменты моделируются независимыми нелинейными дросселями с одинаковыми обмотками, включенными параллельно (рис.3):

$$\sum F_k = \sum (I_k \cdot \varpi) = I \cdot \varpi \quad (8)$$

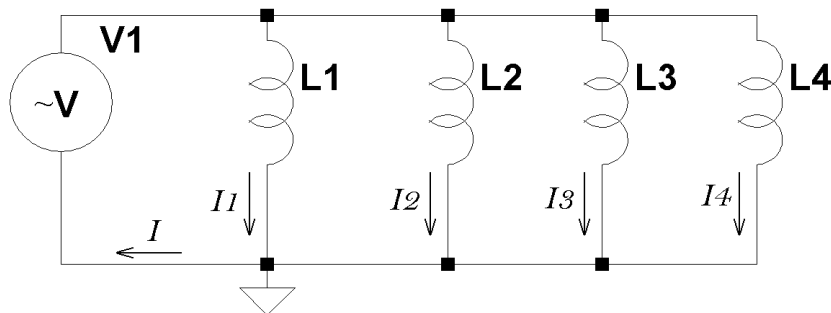


Рис.3 Модель последовательной магнитной цепи

4.2 Моделирование параллельных магнитных цепей

Представим себе некую магнитную цепь, состоящую из k (в данном случае $k=2$), включенных параллельно, фрагментов, имеющих различную длину и сечение (рис.4).

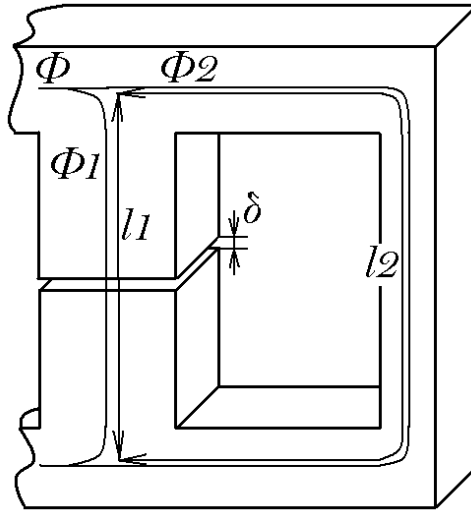


Рис.4 Пример параллельной магнитной цепи

Так как фрагменты магнитной цепи включены параллельно, то к каждому из них приложено одинаковое магнитное напряжение. Одинаковое магнитное напряжение на каждом фрагменте разветвлённой магнитной цепи можно смоделировать соединив k дросселей, имеющих обмотки с равными витками¹, последовательно. Так как при этом через обмотки протекает одинаковый ток I , то к сердечникам прикладывается одинаковое магнитное напряжение $I \cdot \varpi$.

Примечание: 1. Фрагменты реального магнитопровода не имеющие обмотки, в модели всё равно должны быть представлены указанным образом.

4.3 Совместное моделирование параллельной магнитной цепи

Если параллельная магнитная цепь включена последовательно с другой, например последовательной, цепью (рис.5), то необходимо обеспечить равенство общего магнитного потока протекающего через них.

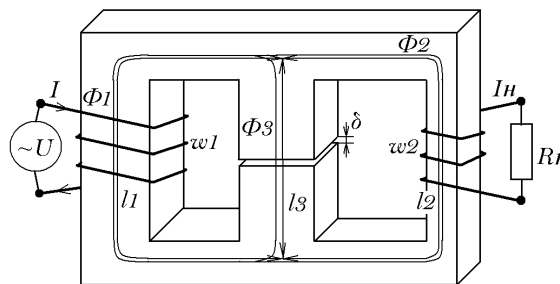


Рис.5 Пример совместной последовательно-параллельной магнитной цепи

Для начала считаем, что R_n , на рис.5, имеет бесконечно большое сопротивление и ни как не влияет на картину происходящего. В параллельной магнитной цепи общий поток является суммой потоков, протекающих по каждому параллельному фрагменту k :

$$\Phi = \sum \Phi_k \quad (9)$$

Параллельная цепь моделируется последовательным включением k дросселей, имеющих одинаковые обмотки. В этом случае элементарные ЭДС E_k , индуцируемые в каждом дросселе, складываются. На основании закона электромагнитной индукции, определим суммарный поток для этого случая:

$$\Phi = \sum \Phi_k = \sum \frac{E_k \cdot \tau}{\varpi} = \frac{E \cdot \tau}{\varpi} \quad (10)$$

То есть, для обеспечения равенства потоков, достаточно для всех дросселей модели указать одинаковое количество витков обмотки и модели отдельных магнитных ветвей включить параллельно (рис.6).

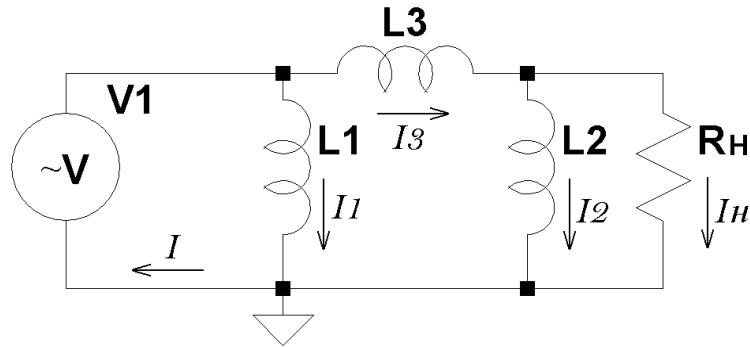


Рис.6 Модель совместной последовательно-параллельной магнитной цепи

Из модели (рис.6) видно, что дроссель L3, по сути, моделирует поток рассеяния Φ_3 между катушками ϖ_1 и ϖ_2 . Поэтому, при подключении нагрузочного резистора R_n к обмотке ϖ_2 , напряжение на ней падает.

4.4. Выводы

Каждый фрагмент реального магнитопровода в модели представляется элементарным нелинейным дросселем, имеющим материал магнитопровода, его длину и сечение соответствующие моделируемому фрагменту. Все параллельные ветви реального магнитопровода в модели представляются соответствующими нелинейными дросселями, включенными последовательно, и наоборот. На все нелинейные дроссели модели мотаются обмотки с одинаковым количеством витков, равным количеству витков входной или выходной обмотки прототипа. При необходимости, для согласования модели с остальными элементами схемы, можно использовать дополнительные идеальные согласующие трансформаторы.

5. Адаптация модели для магнитных цепей, работающих с частичным или полным подмагничиванием

Если через обмотки электромагнитного компонента протекает постоянный ток, то распределение потока в его магнитных цепях определяется уже не законом электромагнитной индукции, а их магнитным сопротивлением и законом Ома для магнитных цепей. Что касается модели, то в ней распределение потоков определяется омическим сопротивлением обмоток нелинейных дросселей. Следовательно, чтобы модель корректно отражала процессы, протекающие на постоянном токе в реальной магнитной цепи, достаточно последовательно с каждой обмоткой модели включить нелинейное сопротивление, обратно пропорциональное магнитному сопротивлению моделируемого фрагмента магнитной цепи. Так как эта часть модели работает на постоянном токе, то нет необходимости в том, чтобы нелинейные сопротивления обладали гистерезисом.

5.1 Адаптация модели последовательных участков магнитной цепи

На рис.7 изображена модель последовательной магнитной цепи с нелинейными сопротивлениями обмоток.

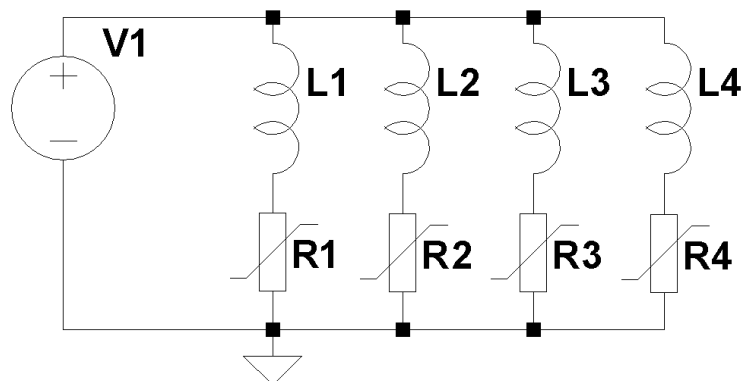


Рис.7 Модель последовательной магнитной цепи с нелинейными сопротивлениями обмоток

Нелинейное сопротивление можно изготовить из стандартного источника тока управляемого напряжения. Для формирования требуемой вольтамперной характеристики (ВАХ) нелинейного сопротивления можно использовать табличную форму задания. Для примера, ниже приведена строка настройки нелинейного резистора, имитирующего кривую намагничивания сердечника длиной 1м и сечением 1м² из феррита М3000НМС1, при температуре 100°С. В строке настройки указан ряд пар значений, первое значение пары указывает индукцию в сердечнике, а второе значение соответствующую напряжённость магнитного поля:

table=(-0.465	-10000,-0.45	-2500,-0.4	-320,-0.3	-85,-0.2	-35,-0.1	-15,0	0,0.1	15,0.2	35,0.3	85,0.4	320,0.45	2500,0.465	10000)
---------------	--------------	------------	-----------	----------	----------	-------	-------	--------	--------	--------	----------	------------	--------

На рис.8 показана результирующая ВАХ нелинейного резистора, снятая при помощи программы SWCad.

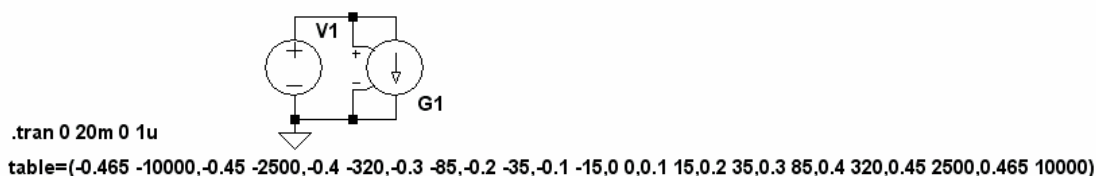
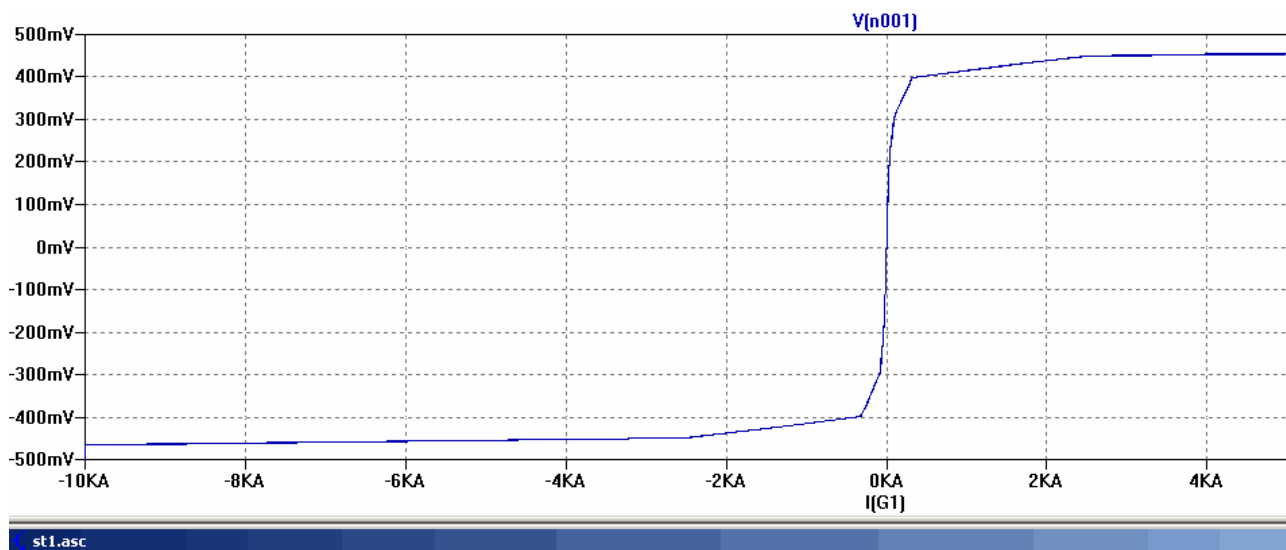


Рис.8 Кривая намагничивания феррита М3000НМС1, имитируемая при помощи нелинейного резистора, построенного на источнике тока, управляемого напряжением.

Для более детальной аппроксимации достаточно лишь расширить таблицу дополнительными данными.

Так как размеры используемых магнитопроводов отличаются от тех, которые были приняты при тестировании, то, перед установкой в модель, каждый нелинейный резистор должен быть настроен в соответствии с параметрами моделируемого фрагмента магнитопровода и соответствующей нелинейной индуктивности, последовательно с которой он будет включен. Величину управляющего напряжения V^* , для нового сечения A магнитопровода, можно определить по формуле:

$$V^* = V \cdot A \quad (3)$$

Соответствующую величину тока I^* , для магнитопровода, имеющего длину L_M , немагнитного зазора L_G и обмотку N , можно рассчитать по формуле:

$$I^* = \frac{I \cdot L_M + B \cdot 796000 \cdot L_G}{N} \quad (4)$$

Для правильного распределения магнитных потоков важны относительные значения нелинейных резисторов. При выборе абсолютных значений сопротивлений надо стремиться к тому, чтобы общее сопротивление, для группового включения нелинейных резисторов, примерно соответствовало активному сопротивлению соответствующей обмотки моделируемого электромагнитного компонента.

Согласование величин нелинейных сопротивлений с активным сопротивлением обмотки R возможно с помощью некоторого поправочного коэффициента K , на который перемножаются все скорректированные управляющие напряжения всех нелинейных сопротивлений модели. В свою очередь, выбор поправочного коэффициента, вызывает определённые трудности, так как после пересчёта нелинейных сопротивлений их координаты не совпадают. Для выбора поправочного коэффициента необходимо определить общее сопротивление всех нелинейных резисторов R_n , в режиме без насыщения, и затем разделить на него сопротивление обмотки:

$$K = \frac{R}{R_n}$$

Процесс можно упростить, если в магнитопроводе имеется фрагмент с немагнитным зазором. В этом случае можно выбрать пару $V^* I^*$ соответствующую фрагменту с зазором, находящуюся на линейном участке

кривой намагничивания. Далее рассчитывается поправочный коэффициент $K = \frac{R \cdot I^*}{V^*}$ на который затем

умножить все, ранее рассчитанные, величины V^* всех нелинейных сопротивлений модели.

Падение напряжения на нелинейном резисторе пропорционально магнитному потоку, протекающему через соответствующий дроссель. Собственно при постоянном токе, о величине магнитного потока можно судить только по падению напряжения на этом резисторе. Поэтому, иногда, величину нелинейного резистора стоит выбирать из соображений удобства наблюдения магнитного потока.

6. Создание модели интегрированного магнитного компонента

Теперь, когда мы определились с принципами моделирования не разветвлённых, разветвлённых и сложных магнитных цепей, попробуем создать модель трансформатор с магнитопроводом имеющим сложную структуру.

В настоящее время в источниках вторичного электропитания всё чаще используются интегрированные электромагнитные компоненты совмещающие в себе разделительный трансформатор и дроссель фильтра. Так же известны удачные попытки моделирования подобных компонентов средствами SIMPLORER[4].

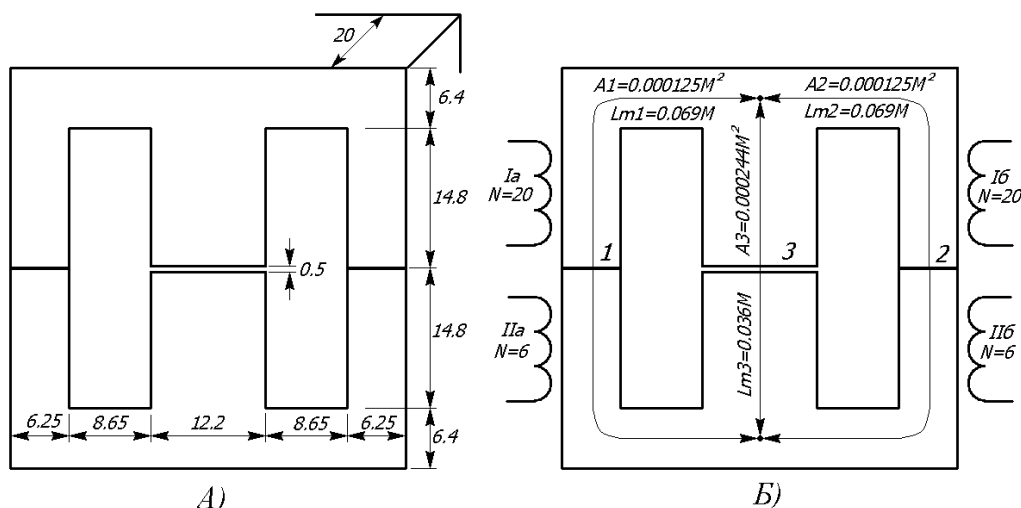


Рис.9 Конструктивные параметры реального интегрированного магнитного компонента.

Для примера, создадим модель сложного электромагнитного компонента, изготовленного на ферритовом магнитопроводе **Е 42/21/20** (рис.9а). Для удобства керны пронумерованы, крайним присвоены номера 1 и 2, а среднему номер 3. КERN №3 имеет немагнитный зазор длиной $Lg=0.0005m$. На кернах №1,2 расположено по две обмотки, одна из которых имеет 20 витков, а другая 6 витков (рис.9б). Обмотки Ia и Ib имеют сопротивление по 0.02 ом.

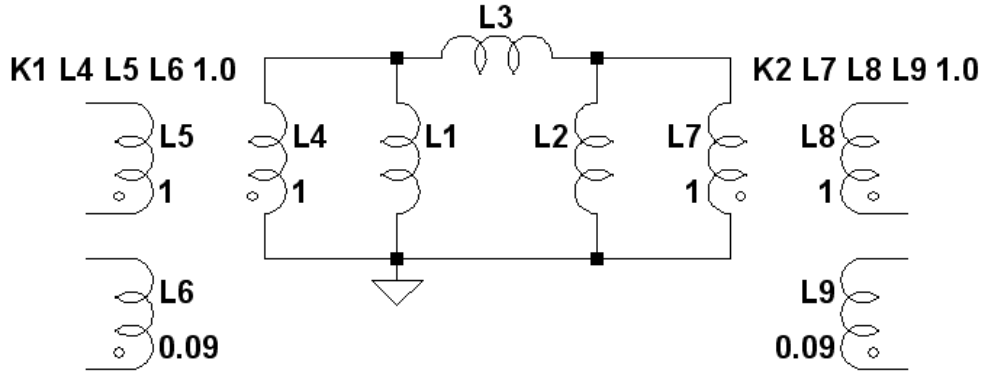
Ранее мы уже моделировали подобную структуру магнитопровода. На рис.6 изображена соответствующая схема для переменного тока. На рис.10 изображена схема модели переменного тока для рассматриваемого примера. Здесь индуктивности $L1,L2,L3$ соответственно имитируют участки 1,2,3 магнитной цепи, изображённой на рис.9б. Кроме этого, для гальванической развязки обмоток и получения требуемых намоточных данных, в модели использовано два идеальных трансформатор, K1 и K2.

Так как часть интегрированного компонента используется в качестве дросселя постоянного тока, то необходимо дополнить модель соответствующими нелинейными сопротивлениями, которые сделают её более реалистичной и достоверной.

Ранее мы определили таблицу настройки нелинейного сопротивления для случая, когда магнитопровод имеет длину l_m , сечение l_m^2 и на него намотана обмотка в 1 виток:

table=(-0.465 -10000,-0.45 -2500,-0.4 -320,-0.3 -85,-0.2 -35,-0.1 -15,0 0,0.1 15,0.2 35,0.3 85,0.4 320,0.45 2500,0.465 10000)

Hc=12 Bs=0.45 Br=0.1 A=0.000244 Lm=0.036 Lg=0.0005 N=20



Hc=12 Bs=0.45 Br=0.1 A=0.000125 Lm=0.069 Lg=0 N=20

Hc=12 Bs=0.45 Br=0.1 A=0.000125 Lm=0.069 Lg=0 N=20

Рис.10 Модель интегрированного магнитного компонента для переменного тока.

Скорректируем таблицы нелинейных резисторов с помощью формул (3) и (4). Для кернов 1 и 2:

table=(-0.011625 -34.5,-0.01125 -8.625,-0.01 -1.104,-0.0075 -0.29325,-0.005 -0.12075,-0.0025 -0.05175,0,0,0.0025 0.05175,0.005 0.12075,0.0075 0.29325,0.01 1.104,0.01125 8.625,0.011625 34.5)

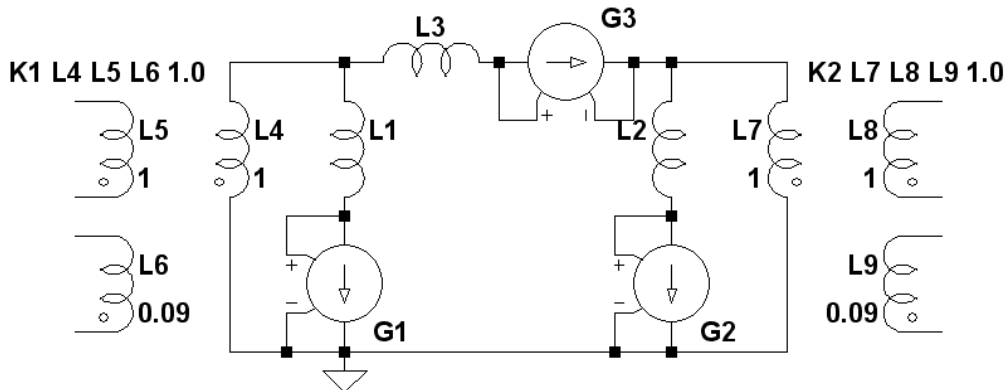
Для керна 3:

table=(-0.022692 -27.2535,-0.02196 -13.455,-0.01952 -8.536,-0.01464 -6.123,-0.00976 -4.043,-0.00488 -2.017,0,0,0.00488 2.017,0.00976 4.043,0.01464 6.123,0.01952 8.536,0.02196 13.455,0.022692 27.2535)

При подгонке величины нелинейных сопротивлений использовался поправочный коэффициент K=200.

Полная модель интегрированного магнитного компонента изображена на рис.11. Отображение таблиц нелинейных сопротивлений G1,G2,G3 отключено, с тем чтобы не загромождать схему лишней информацией.

Hc=12 Bs=0.45 Br=0.1 A=0.000244 Lm=0.036 Lg=0.0005 N=20



Hc=12 Bs=0.45 Br=0.1 A=0.000125 Lm=0.069 Lg=0 N=20

Hc=12 Bs=0.45 Br=0.1 A=0.000125 Lm=0.069 Lg=0 N=20

Рис.11 Полная модель интегрированного магнитного компонента

Как уже говорилось ранее, для контроля индукции в определённом участке магнитопровода, удобно контролировать падение напряжения на нелинейном резисторе, который включен последовательно с соответствующей нелинейной индуктивностью. Крайние значения напряжения управления в настроечных таблицах соответствуют максимальной учтённой индукции в сердечнике. Например, для кернов 1 и 2, модуль падения напряжения на G1 и G2 равный 0.011625В, будет соответствовать индукции 0.465Тл. Следовательно, чтобы наблюдать сигнал пропорциональный индукции, достаточно умножить соответствующий график на 0.465/0.011625=40.

1. IEEE Transactions On Computer-Aided Design, Vol. 10. No. 4, April 1991

2. Л.А.Бессонов. Теоретические основы электротехники. Издание шестое, переработанное и дополненное. Москва: Издательство "Высшая школа", 1973 год, стр.68-76.

3. В.П.Миловзоров. Электромагнитная техника. Москва: Издательство "Высшая школа", 1966 год, стр. 13-30.

5. А.Н,Горский, Ю.С.Русин, Н.Р.Иванов, Л.А.Сергеева. Расчёт электромагнитных элементов источников

вторичного электропитания. Москва: Радио и Связь, 1988 год, рис. 2.17.

4. H.Njiende, H.Wetzel, N.Froehleke, W.A.Cronje. Models of integrated magnetic components for simulation based design of SMPS with SIMPLORER. <http://www.lea.uni-paderborn.de/fileadmin/Elektrotechnik/AG-LEA/forschung/veroeffentlichungen/2003/03epe-njiende-wetzel-froehleke-cronje.pdf>