

Создание SPICE-моделей магнитных компонентов с использованием систем AccuSim II и Eldo

Юрий Злоказов, Юрий Климанский (г. Снежинск),
Андрей Лохов, Алексей Рабоволук (Москва)

В статье подробно описаны методы создания специализированных SPICE-моделей (макромоделей) трансформаторов в системах аналогового моделирования AccuSim II и Eldo, приведены результаты верификации моделей и сделана оценка точности моделирования.

ВВЕДЕНИЕ

Создание специализированных SPICE-моделей и, в частности SPICE-моделей магнитных сердечников, учитывающих воздействие магнитного поля, температуры и частоты, для проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является актуальной задачей.

В настоящее время заслуживают внимания несколько моделей перемангничивания ферромагнитных материалов. К ним в первую очередь относятся математические модели гистерезиса, описанные в [1] и модель перемангничивания Джилса-Атертона [2]. Что касается моделей перемангничивания, представленных в работе [1], то вопрос их практического использования по-прежнему остаётся открытым. Модель перемангничивания Джилса-Атертона (далее по тексту ДАМ) является наиболее удачной для анализа процессов в РЭА. Вследствие относительной простоты

математического описания она получила широкое распространение в схемотехническом моделировании.

Однако практическое использование модели, условно названной базовой ДАМ, сопровождается значительными трудностями. Ни оригинальное описание [2], ни последующие работы авторов не содержат методик определения параметров модели. Кроме того, модель не учитывает частотных свойств петли перемангничивания.

Для повышения точности расчётов с применением ДАМ в работе [3] предлагается определять параметры модели по экспериментально снятым для различных амплитуд индукции семействам петель гистерезиса. Однако такой подход требует уточнения параметров модели с помощью оптимизации отклонения экспериментальных и расчётных точек семейства петель, что очень громоздко.

Для учёта частотных свойств материалов сердечников в работе [4] выполнена модификация базовой ДАМ – получена зависимость коэрцитивной силы от скорости перемангничивания. Однако использование предлагаемого этой методикой численного интегрирования для решения основного уравнения базовой ДАМ вызывает затруднения у обычного пользователя.

В работе [5] предложена модификация ДАМ, учитывающая частотные свойства аморфных магнетиков путём введения зависимости величины коэрцитивной силы от скорости изменения магнитного поля. Однако и в этом случае вопрос практического использования предлагаемой методики остаётся открытым.

В работе [6] рассмотрена уточнённая математическая модель сердечника, позволяющая адекватно отобразить монотонное снижение проницаемости, характерное для ферромагнетиков при сильных магнитных полях. В работе [7] описана методика определения параметров модели. К сожалению, предлагаемая модель сложна, описывается большим числом параметров, определение которых представляет большую сложность. В работе [8] говорится об увеличении точности расчётов с применением ДАМ. Однако это требует усложнения методики определения параметров модели и ввода в базовую ДАМ дополнительных элементов для учёта частотных свойств.

В справочных руководствах по системам моделирования AccuSim II и Eldo [9,10] описаны встроенные SPICE-модели трансформаторов, приведены уравнения, положенные в основу их создания, обозначены общие подходы к построению моделей. Как показывает проведённый анализ, модели относительно просты и описываются сравнительно небольшим числом параметров. При наличии установки контроля магнитных параметров сердечников [11] проблема определения параметров моделей существенно облегчается. Кроме того, модели просты для практического

.SUBCKT <имя макромодели> <узлы подключения к внешней схеме> * Описание обмотки W <порядковый_номер_обмотки> node+ node- B <порядковый_номер_сердечника> +TURNS= <значение> K= <значение> L= <значение> R= <значение> +WDIA= <значение> WPER= <значение> WAREA= <значение> +AWG= <значение> MLT= <значение> TEMP= <значение> IC= <значение> * Описание сердечника B <порядковый_номер_сердечника> <имя модели сердечника> +LENGTH= <значение> AIRGAP= <значение> AREA= <значение> +WINDOW= <значение> BFREQ= <значение> BTEMP= <значение> +B0= <значение> AL= <значение> * Описание модели сердечника .MODEL <имя модели сердечника> CORE +LEVEL= <значение> BS= <значение> BR= <значение> HC= <значение> +MUR= <значение> F1= <значение> F2= <значение> F3= <значение> +FBS= <значение> FBR= <значение> FHC= <значение> .ENDS		TURNS – число витков обмотки; K – коэффициент связи между обмоткой и сердечником; L (Гн) – индуктивность рассеяния обмотки; R (Ом) – сопротивление обмотки на постоянном токе; WDIA (м) – диаметр провода обмотки; WPER (м) – периметр провода обмотки; WAREA (м²) – площадь поперечного сечения провода обмотки; AWG – номер провода из американского сортамента проводов; MLT (м) – средняя длина витка провода обмотки; TEMP и BTEMP (°C) – температура окружающей среды; IC (А) – начальный ток обмотки; LENGTH (м) – средняя длина магнитной силовой линии в сердечнике; AIRGAP (м) – длина воздушного зазора в сердечнике; AREA (м²) – эффективная площадь поперечного сечения сердечника; WINDOW (м) – высота окна сердечника; BFREQ (Гц) – частота перемангничивания сердечника; B0 (Тл) – начальная магнитная индукция; AL (Гн) – коэффициент индуктивности на 1000 витков; LEVEL – уровень сложности модели; BS (Тл) – индукция насыщения; BR (Тл) – остаточная магнитная индукция; HC (А-витки/м) – коэрцитивная сила; MUR – относительная магнитная проницаемость материала сердечника при H = HC; F1, F2 и F3 – коэффициенты зависимости HC от BFREQ; FBS, FBR и FHC (1/°C) – коэффициенты зависимости BS, BR и HC от температуры.
--	--	---

Рис. 1. Формат описания макромодели трансформатора в системе AccuSim II

го использования. Вместе с тем они учитывают температурные и частотные зависимости характеристик материалов магнитных сердечников. И, наконец, при проектировании РЭА с применением маршрута Expedition Flow [12] модели легко встраиваются в упомянутый маршрут. Эти характеристики позволяют рассматривать модели магнитных компонентов AccuSim II и Eldo как весьма привлекательные.

Ниже подробно описаны методы создания SPICE-моделей (макромоделей) трансформаторов в системах AccuSim II и Eldo, приведены результаты верификации моделей и оценена точность моделирования.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ACCUSIM II ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАКРОМОДЕЛЕЙ

Система аналогового моделирования AccuSim II входит в состав маршрута сквозного проектирования топологии печатных плат Board Station. Описание макромодели трансформатора начинается с ключевого слова .SUBCKT. За ним следуют название макромодели и узлы её подключения к схеме. Ключевое слово .ENDS завершает описание. Между ключевыми словами .SUBCKT и .ENDS размещаются строки описания обмоток, магнитного сердечника и модели сердечника.

Описание обмотки трансформатора начинается с обозначения и содержит значения геометрических и электрических параметров обмотки. Обозначение обмотки всегда начинается с буквы «W», за которой обычно следует её порядковый номер. Затем указываются узлы подключения обмотки и сам сердечник. Узлом node+ подключения обмотки служит её начало (в обозначении трансформатора помечено «+»), узлом node- – конец обмотки. Обозначение сердечника всегда начинается с буквы «B», за которой обычно следует его порядковый номер. Количество строк описания обмоток определяется числом обмоток трансформатора (см. рис. 1).

Описание магнитного сердечника начинается с обозначения и содержит значения его геометрических параметров. Обозначение сердечника должно совпадать с его обозначением в описании обмоток. Затем следует обозначение модели сердечника, задаваемое пользователем.

Описание модели сердечника начинается с ключевого слова .MODEL и со-

держит значения параметров встроенной в AccuSim II модели. За ним следует обозначение модели сердечника, совпадающее с его обозначением в описании сердечника и ключевое слово .CORE, указывающее на принадлежность модели к моделям магнитных сердечников.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПАРАМЕТРАХ И УРОВНЯХ СЛОЖНОСТИ МОДЕЛИ В ACCUSIM II

Параметры LEVEL, BS, BR, HC и MUR управляют взаимосвязью между магнитной индукцией B и напряжённостью намагничивающего поля H для заданного ферромагнитного материала.

Параметр MUR представляет собой относительную магнитную проницаемость материала сердечника и характеризует наклон кривой $B(H)$ в точке пересечения с осью H . Если $B(H)$ – кривая намагничивания, то пересечение имеет место в точке $H = 0$. Для нелинейной кривой намагничивания значение параметра MUR может отличаться от начальной магнитной проницаемости материала сердечника, приводимой в справочной литературе. Если $B(H)$ – предельная петля гистерезиса, то пересечение с осью H происходит в точках $H = HC$ и $H = -HC$. По этой причине, как показано ниже, MUR определяют как относительную магнитную проницаемость материала сердечника при $H = HC$ (см. рис. 2).

Уровень сложности модели устанавливается с помощью параметра LEVEL. Модель можно выбрать линейную с ненасыщенным сердечником или нелинейную с насыщенным сердечником. Нелинейная модель в свою очередь может учитывать или не учитывать гистерезис.

Линейная модель сердечника LINEAR не учитывает его насыщение и описывается линейной характеристикой $B(H)$. Наклон характеристики равен абсолютной магнитной проницаемости материала сердечника μ_a (см. рис. 3).

Гиперболическая модель сердечника SAT_HYP предназначена для учёта насыщения сердечника без гистерезиса и используется, когда необходимо быстро просмотреть форму основной кривой намагничивания без значительных затрат времени на проведение моделирования. Если полученная при моделировании кривая совпадает по форме с экспериментально снятой кривой, то для учёта гистерезиса целесообразно повторить моделирование с использо-

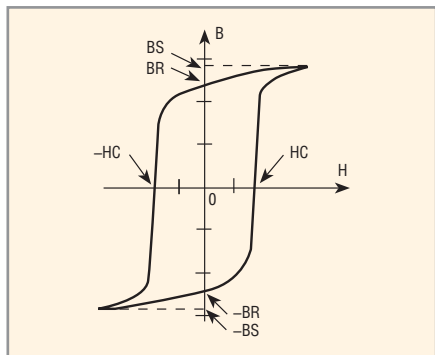


Рис. 2. Кривая перемагничивания сердечника

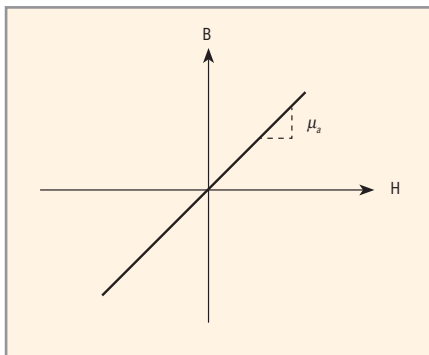


Рис. 3. Линейная кривая намагничивания

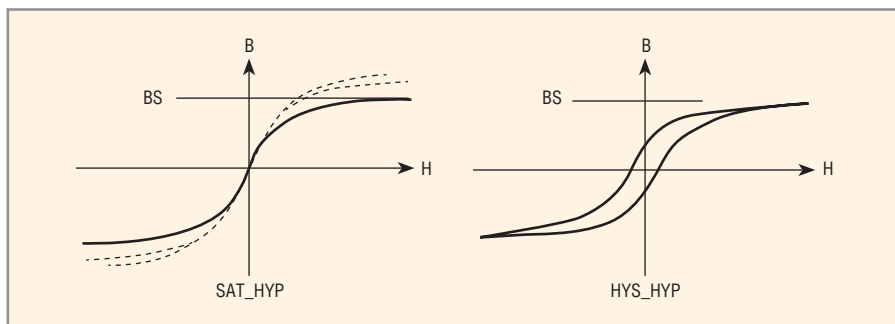


Рис. 4. Кривые намагничивания для гиперболических моделей

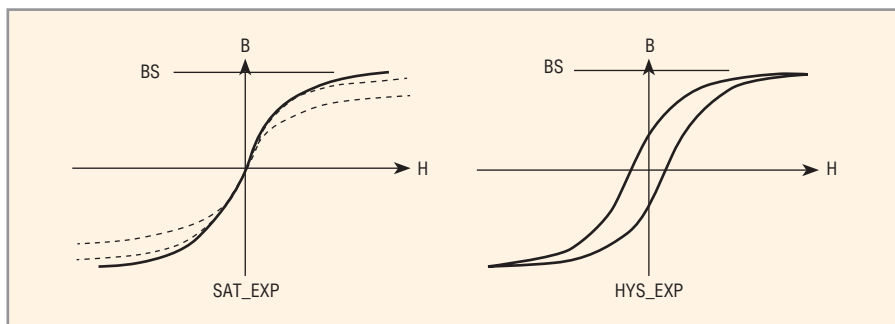


Рис. 5. Кривые намагничивания для экспоненциальных моделей

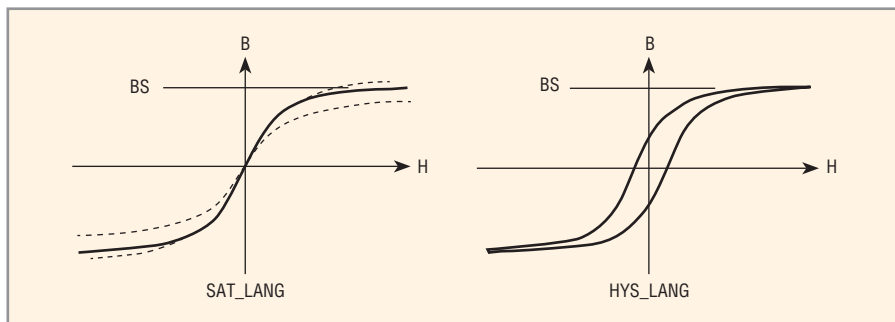


Рис. 6. Кривые намагничивания для моделей Лангевина

ванием HYS_HYP модели (см. рис. 4 – слева сплошной линией изображена кривая намагничивания для гиперболической модели). Дополнительно, для сравнения кривых намагничивания от разных моделей, приведены две пунктирные линии. Верхняя линия в первом квадранте соответствует кривой намагничивания для экспоненциальной модели, нижняя – кривой намагничивания для модели Лангевина.

При выборе гиперболической функции магнитная индукция B связана

с напряжённостью магнитного поля H уравнением:

$$B = BS \times \frac{H}{|H| + S} + \mu_0 \times H, \quad (1)$$

где

$$S = \frac{BS}{\mu_0 \times (\mu - 1)}. \quad (2)$$

Экспоненциальную модель сердечника SAT_EXP можно использовать для моделирования насыщения сердечника, с тем чтобы быстро получить основную кривую намагничивания сердечника и сравнить её по форме с экс-

периментально снятой кривой. Перед началом измерений сердечник должен быть полностью размагничен. В случае совпадения кривых, для учёта гистерезиса можно повторить моделирование с использованием модели HYS_EXP (см. рис. 5 – слева сплошной линией изображена кривая намагничивания для экспоненциальной модели). Верхняя пунктирная линия в первом квадранте соответствует кривой намагничивания для модели Лангевина, нижняя пунктирная линия – кривой намагничивания для гиперболической модели.

При выборе экспоненциальной функции связь между магнитной индукцией B и напряжённостью магнитного поля H описывается уравнением:

$$B = BS \times \left(1 - e^{-\frac{H}{S}} \right) + \mu_0 \times H, \quad (3)$$

где
$$S = \frac{BS}{\mu_0 \times (\mu - 1)}. \quad (4)$$

Модель сердечника Лангевина SAT_LANG можно использовать для быстрого моделирования основной кривой намагничивания сердечника с последующим её сравнением с экспериментально снятой кривой. В случае совпадения кривых, для учёта гистерезиса можно повторить моделирование с использованием модели HYS_LANG (см. рис. 6 – слева сплошной линией изображена кривая намагничивания для модели Лангевина). Верхняя пунктирная линия в первом квадранте соответствует кривой намагничивания для экспоненциальной модели, нижняя пунктирная линия – кривой намагничивания для гиперболической модели.

При выборе функции Лангевина связь между магнитной индукцией B и напряжённостью магнитного поля H описывается уравнением:

$$B = BS \times \left[\cosh\left(\frac{H}{S}\right) - \left(\frac{H}{S}\right) \right] + \mu_0 \times H = BS \times \left[\frac{\left(\frac{H}{S}\right)^3}{3} - \frac{\left(\frac{H}{S}\right)^5}{45} + \frac{2 \times \left(\frac{H}{S}\right)^7}{945} - \dots \right] + \mu_0 \times H, \quad (5)$$

где

$$S = \frac{BS}{3 \times \mu_0 \times (\mu - 1)}. \quad (6)$$

Параметры FBS, FBR и FHC представляют собой коэффициенты линейных температурных зависимостей индукции насыщения BS , остаточной индукции BR и коэрцитивной силы HC . Зависимости имеют вид:

$$BS(TTEMP) = BS \times (1 + FBS \times (TTEMP - TNOM)), \quad (7)$$

$$BR(BTEMP) = \quad (8)$$

$$= BR \times (1 + FBR \times (BTEMP - TNOM)),$$

$$HC(BTEMP) = \quad (9)$$

$$= HC \times (1 + FHC \times (BTEMP - TNOM))$$

где $TNOM = 27^\circ\text{C}$ (номинальная температура). Как правило, температурные коэффициенты имеют отрицательные значения.

Параметры $F1, F2, F3$ являются коэффициентами нелинейной зависимости HC от частоты. Известно, что коэрцитивная сила HC зависит не только

от температуры, но и от частоты. С ростом частоты перематничивания сердечника HC возрастает, что приводит к значительному «растягиванию» петли по горизонтали. В отличие от линейной температурной зависимости, зависимость HC от частоты нелинейная и имеет вид

$$HC(BFREQ) = \quad (10)$$

$$= HC \times (1 + F1 \times BFREQ + F2 \times BFREQ^{F3}).$$

Величины параметров $F1, F2, F3$ можно определить из эксперименталь-

но снятой зависимости HC от частоты. Для получения зависимости используют установку контроля магнитных параметров сердечников.

На основе формата описания в AccuSim II была составлена макро-модель для трехобмоточного трансформатора, выполненного на сплошном тороидальном сердечнике и условно названного transformer_1. Параметры, используемые в описании макромоделей, получены из исходных данных в соответствии с расчётами по известным формулам [13–15]. Исходные данные собраны в таблице 1, а содержание файла описания макромоделей представлено в Листинге 1.

ВЕРИФИКАЦИЯ МАКРОМОДЕЛИ

Для верификации макромоделей использовалась часть схемы прибора, в состав которого входит трансформатор transformer_1 (см. рис. 7). Для приведённой схемы проводилось моделирование с применением пакета SystemVision, а также экспериментальные исследования с использованием контрольно-измерительной аппаратуры. Проверка макромоделей осуществлялась путём сравнения полученных результатов (см. рис. 8).

Как следует из результатов моделирования, напряжение на нагрузке CN , RN представляет собой ступенчато нарастающую кривую. При моделировании кривая напряжения на нагрузке стремится к установившемуся значению примерно 8,5 В (сигнал load), экспериментально снятая кривая стремится к значению примерно 7 В (сигнал ch3). Амплитуды напряжений в цепи $R1, CK$ (сигналы mid_prim и ch2) до и после замыкания контакта UPI при моделировании и измерениях практически совпадают. Таким образом, полученная в результате моделирования диаграмма напряжения на нагрузке по установившемуся значению отличается от снятой экспериментальным путём осциллограммы примерно на 18%.

Разница в уровне напряжений может быть объяснена следующим. Наиболее существенный вклад вносит технологический разброс начальной магнитной проницаемости, которая для ферритов марки M2000NM1 составляет 2000_{-300}^{+500} , т. е. $+25\% \dots -15\%$, что определяет более ранний или более поздний момент наступления насы-

Таблица 1. Исходные данные трансформатора

Параметр	Характеристика	Значение
Параметры сердечника		
	Тип сердечника	M2000NM1 K10 × 6 × 3
μ_n	Начальная магнитная проницаемость материала сердечника	2000
BS	Индукция насыщения, Тл	0,4
BR	Остаточная индукция, Тл	0,12
HS	Напряженность внешнего магнитного поля, соответствующая индукции насыщения, А/м	800
HC	Коэрцитивная сила, А • витки/м	16
D	Наружный диаметр сердечника, м	10×10^{-3}
d	Внутренний диаметр сердечника, м	6×10^{-3}
h	Высота сердечника, м	3×10^{-3}
F	Частота перематничивания сердечника, Гц	50000
Параметры обмоток		
w_1	Число витков первичной обмотки	4
w_2	Число витков первой вторичной обмотки	20
w_3	Число витков второй вторичной обмотки	20
d_1	Диаметр провода первичной обмотки, м	$0,16 \times 10^{-3}$
d_2	Диаметр провода первой вторичной обмотки, м	$0,16 \times 10^{-3}$
d_3	Диаметр провода второй вторичной обмотки, м	$0,16 \times 10^{-3}$

Листинг 1

```
* file transformer_1.mod
.SUBCKT transformer_1 PIN_4 PIN_5 PIN_1 PIN_2 PIN_3
*
W1 PIN_4 PIN_5 B1 TURNS=4 K=1.0 L=9.0841e-10
+ R=0.0354 TEMP=27.0
*
W2 PIN_1 PIN_2 B1 TURNS=20 K=1.0 L=2.2710e-08
+ R=0.1772 TEMP=27.0
*
W3 PIN_2 PIN_3 B1 TURNS=20 K=1.0 L=2.2710e-08
+ R=0.1772 TEMP=27.0
*
B1 m2000nm1 LENGTH=0.0251 AIRGAP=0.0
+ AREA=6.0e-6 WINDOW=0.0251
+ BFREQ=50000.0 BTEMP=27.0 B0=0.0
*
.MODEL m2000nm1 CORE LEVEL=HYS_HYP BS=0.4
+ BR=0.12 HC=16 MUR=2000 F1=0.0
+ F2=0.0 F3=0.0 FBS=0.0
+ FBR=0.0 FHC=0.0
.ENDS
```

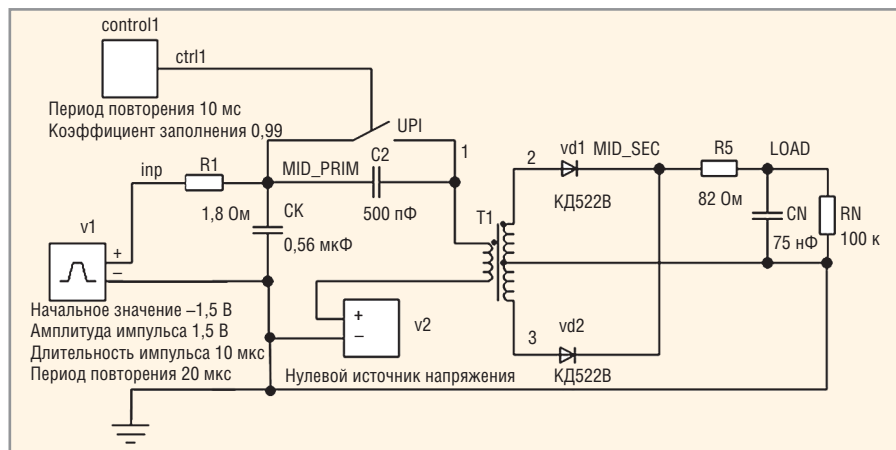



Рис. 7. Схема подключения трансформатора transformer_1

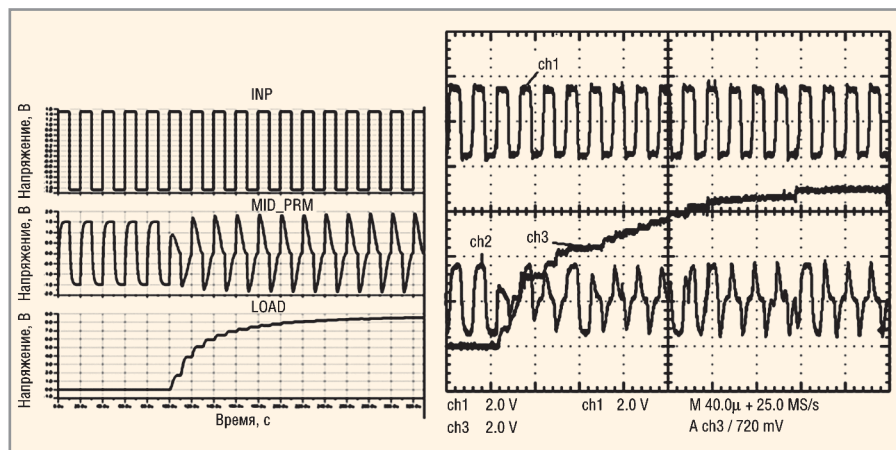


Рис. 8. Результаты моделирования и осциллографирования схемы рис. 7

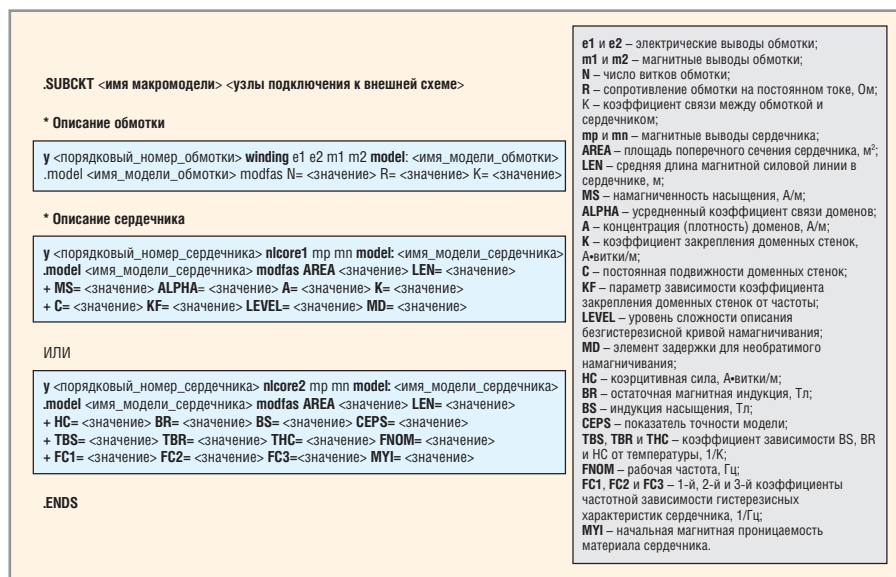


Рис. 9. Формат описания макромодели трансформатора в системе Eldo

щения в магнитопроводе (см. осциллограмму на рис. 8). Площади импульсов на первичной обмотке при наблюдении осциллографом заметно меньше, чем аналогичные при моделировании. Соответственно, энергия, передаваемая трансформатором в нагрузку, также меньше. Иными словами, насыщение реального сердечника наступает быстрее.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ELDO ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАКРОМОДЕЛЕЙ

Система Eldo – это аналоговый симулятор, основной компонент комплексного набора инструментальных программных средств аналогового и смешанного моделирования. Eldo предлагает уникальную схему разделения, позволяющую использовать раз-

личные алгоритмы в разных частях проекта. Это даёт возможность пользователю осуществлять гибкое регулирование точности моделирования, используя широкий ассортимент библиотек моделей устройств в сочетании с высокой скоростью и эффективностью.

Правила описания макромоделей в системе Eldo аналогичны общим правилам в системе AccuSim II. Описание макромодели трансформатора начинается с ключевого слова .SUBCKT и заканчивается ключевым словом .ENDS. Между ключевыми словами .SUBCKT и .ENDS размещаются строки описания обмотки, магнитного сердечника и моделей обмоток и сердечника. Формат описания макромодели трансформатора с использованием системы Eldo представлен на рисунке 9.

Описание обмотки трансформатора начинается с её обозначения в виде обязательной буквы «y» с последующим порядковым номером обмотки. Затем указывается ключевое слово winding, обозначающее принадлежность модели к моделям обмоток. Далее следуют электрические и магнитные выводы обмотки. Электрические выводы e1 и e2 предназначены для включения обмотки в электрическую цепь макромодели трансформатора. Выводом e1 служит начало обмотки (в обозначении трансформатора помечено «»), выводом e2 – конец обмотки. Магнитные выводы обмотки m1 и m2 предназначены для включения обмотки в магнитную цепь, состоящую из намагничивающих ампер-витков обмоток (между узлами m1 и m2 каждой обмотки) и магнитного сопротивления сердечника (между узлами mpr и mnp сердечника (см. ниже). Завершает описание обмотки ссылка на модель в виде ключевого слова model с последующим названием модели обмотки. На рисунке 10 приведено условное графическое обозначение модели обмотки. Его не следует путать с обозначением обмотки на схеме электрической принципиальной.

Описание модели обмотки начинается с ключевого слова .model и содержит значения параметров встроенной в Eldo модели. За ним следует название модели обмотки, совпадающее с названием в описании обмотки, и ключевое слово modfas, указывающее на принадлежность модели к аналоговым макромоделям.

Описание магнитного сердечника содержит значения его геометрических

параметров и всегда начинается с буквы «у», за которой обычно следует порядковый номер сердечника. Затем указывается ключевое слово `nlcore1` или `nlcore2`, означающее, что для сердечника использованы модели первого или второго уровня сложности соответственно. Далее следуют магнитные выводы сердечника `mp` и `mn`, предназначенные для включения сердечника в магнитную цепь макромодели. Завершает описание сердечника ссылка на модель в виде ключевого слова `.model` с последующим именем модели сердечника.

Описание модели сердечника начинается с ключевого слова `.model` и содержит значения параметров встроенной в Eldo модели. За ним следует наз-

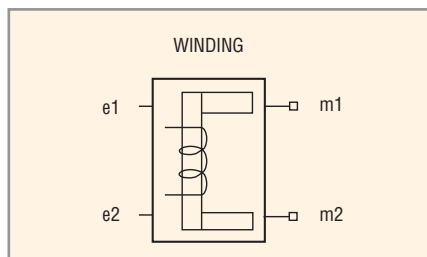


Рис. 10. Условное графическое обозначение модели обмотки

вание модели сердечника, совпадающее с названием в описании сердечника и ключевое слово `modfas`, указывающее на принадлежность модели к аналоговым макромоделям. На рисунке 11 приведено условное графическое обозначение модели сердечника.

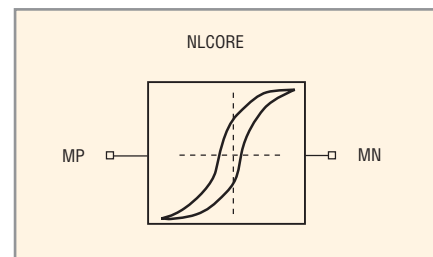


Рис. 11. Условное графическое обозначение модели сердечника

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПАРАМЕТРАХ ПЕРВОГО И ВТОРОГО УРОВНЯ СЛОЖНОСТИ МОДЕЛИ СЕРДЕЧНИКА В ELDO

Описание гистерезисных процессов в модели `nlcore1` основано на теории движения доменных стенок в магнитном поле. Намагниченность насыщения `MS` определяет предельный цикл перемагничивания и пропорциональна максимальной индукции насыщения. По умолчанию, $MS = 1,7 \times 10^6$ А/м. Безразмерный параметр `ALPHA` представляет собой усреднённый коэффициент связи доменов. $ALPHA = 1 \times 10^{-3}$ (по умолчанию). Безразмерный параметр `A` характеризует концентрацию (плотность) доменов и по умолчанию равен 1×10^{-3} .

Параметр `K` представляет собой коэффициент закрепления доменных стенок (постоянная подвижности доменов) и равен коэрцитивной силе H_c , определяющей ширину предельной петли гистерезиса. По умолчанию $K = 10$ А • витков/м. Безразмерный параметр `C` представляет собой постоянную подвижности доменных стенок (постоянную упругого смещения доменных границ). Параметр обеспечивает моделирование слабых полей и связывает наклон безгистерезисной и начальной кривых намагничивания (по умолчанию равен 0,1).

Безразмерный параметр `KF` характеризует зависимость коэффициента закрепления доменных стенок от частоты и по умолчанию равен 1×10^{-6} . Параметр `LEVEL` обозначает уровень сложности описания безгистерезисной кривой намагничивания. Если `LEVEL = 1`, то для описания используется функция Лангевина. Если `LEVEL = 2`, то кривая описывается с помощью гиперболической функции $\tanh$. По умолчанию `LEVEL = 1`. Безразмерный параметр `MD` представляет собой элемент задержки для необратимого намагничивания и по умолчанию равен 1×10^{-5} .

В модели `nlcore2` учитываются зависимости гистерезисных характеристик сердечника от частоты и темпера-

Таблица 2. Исходные данные и описание макромодели трансформатора в Eldo

Параметр	Характеристика	Значение
Параметры сердечника		
	Тип сердечника	M2000HM1 K16 × 10 × 4,5
μ_n	Начальная магнитная проницаемость материала сердечника	2000
BS	Индукция насыщения, Тл	0,4
BR	Остаточная индукция, Тл	0,12
HS	Напряженность внешнего магнитного поля, соответствующая индукции насыщения, А/м	800
HC	Коэрцитивная сила, А • витки/м	16
D	Наружный диаметр сердечника, м	16×10^{-3}
d	Внутренний диаметр сердечника, м	10×10^{-3}
h	Высота сердечника, м	$4,5 \times 10^{-3}$
F	Частота перемагничивания сердечника, Гц	$15,625 \times 10^3$
Параметры обмоток		
w_{11}, w_{12}	Число витков первичных обмоток	85
w_2	Число витков вторичной обмотки	15
R_{11}, R_{12}	Активное сопротивление первичных обмоток, Ом	1,816
R_2	Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	0,044
l	Длина намотки, м	0,0408
Δ	Суммарная высота слоёв намотки, м	6×10^{-3}

Листинг 2

```
* file transformer_2.mod
.subckt transformer_2 pin_1 pin_2 pin_3 pin_4 pin_5
*
ymod_prim_11 winding pin_1 pin_2 p1 p2 model:mod_prim_11
.model mod_prim_11 modfas n=85 r=1.816 k=1.0
*
ymod_prim_12 winding pin_2 pin_3 p2 p3 model:mod_prim_12
.model mod_prim_12 modfas n=85 r=1.816 k=1.0
*
ymod_prim_2 winding pin_4 pin_5 p3 p4 model:mod_prim_2
.model mod_prim_2 modfas n=15 r=0.044 k=1.0
*
ymod_core nlcore2 p4 p1 model:mod_core
.model mod_core modfas area=1.35e-5 len=0.0408 hc=16
+ br=0.12 bs=0.4 fnom=15.625e3 myi=2000
.ends
```

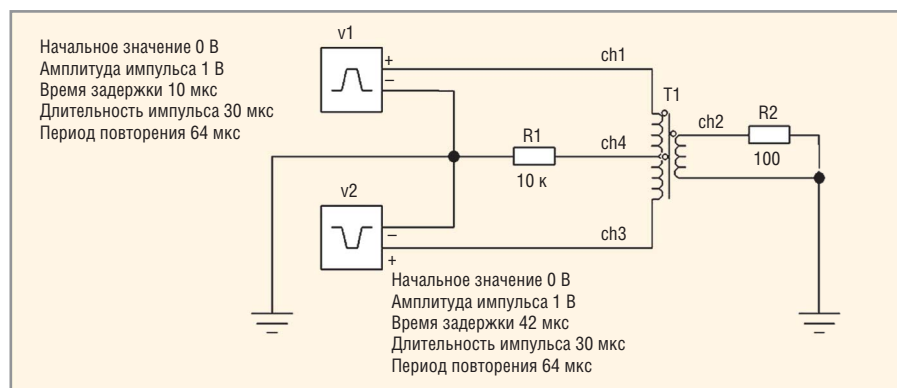


Рис. 12. Схема подключения трансформатора transformer_2

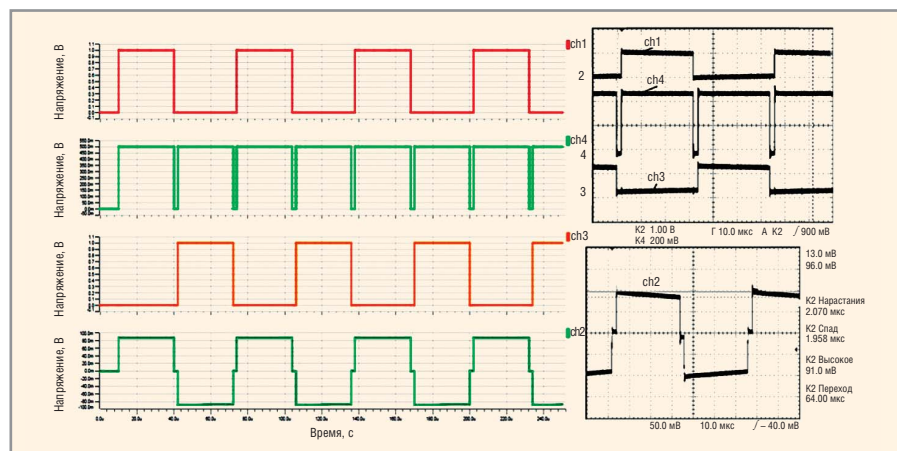


Рис. 13. Результаты моделирования и осциллографирования схемы рис. 12

туры. Ниже перечислены соответствующие параметры:

- TBS, TBR и THC – коэффициенты зависимости BS, BR и HC от температуры, 1/K (по умолчанию все эти параметры равны 0);
- FNOM – рабочая частота, Гц (по умолчанию – 1000);
- FC1, FC2 и FC3 – первый, второй и третий коэффициенты частотной зависимости гистерезисных характеристик сердечника (безразмерный параметр, по умолчанию FC1 = 1, FC2 = 0 и FC3 = 0).

На основе формата описания в Eldo была составлена макромодель для трёхобмоточного трансформатора, выполненного на сплошном тороидальном сердечнике и условно названного transformer_2. Параметры, используемые в описании макромодели, получены из исходных данных в соответствии с расчётами по известным формулам, представленным в [13–15]. Исходные данные и содержание файла описания макромодели представлены в таблице 2 и Листинге 2.

ВЕРИФИКАЦИЯ МАКРОМОДЕЛИ

Для верификации макромодели использовалась часть схемы прибора, в состав которого входит трансформа-

тор transformer_2 (см. рис. 12). Для приведённой схемы проводилось моделирование с применением пакета SystemVision, а также экспериментальные исследования с использованием контрольно-измерительной аппаратуры. Проверка макромодели осуществлялась путём сравнения полученных результатов (см. рис. 13).

Как следует из результатов моделирования, значение амплитуды напряжения на нагрузке трансформатора, полученное при моделировании, приблизительно равно 88 мВ (сигнал ch2). Согласно результатам измерений тестовой схемы, значение амплитуды указанного сигнала приблизительно равно 96 мВ. Таким образом, полученная в результате моделирования диаграмма напряжения на нагрузке по амплитудному значению отличается от снятой экспериментальным путём осциллограммы примерно на 8%. Разница в уровнях напряжений обусловлена разбросом технологических параметров сердечников, который не учитывается в приведённых моделях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработаны и подробно описаны методы создания SPICE-макромоделей трансформаторов с по-

мощью систем AccuSim II и Eldo. Полученные с применением этих методов макромодели трансформаторов позволяют проводить моделирование на базе маршрута Expedition Flow.

ЛИТЕРАТУРА

1. Isaak D. Mayergoyz. Mathematical models of Hysteresis and their applications. Department of Electrical and Computer Engineering University of Maryland, USA, 2003.
2. Jiles D. C., Atherton D. L. Theory of ferromagnetic hysteresis. Journal of magnetism and magnetic materials, vol. 61, No 6, 1986.
3. Новиков А.А., Амелин С.А. Экспериментальное исследование параметров модели перемagnetизации ферромагнетиков Джилса-Атертона. Электричество, № 9, 1995.
4. Амелин С.А., Новиков А.А., Строев К.Н., Строев Н.Н. Расчёт потерь в аморфных магнитных материалах с помощью модифицированной модели Джилса-Атертона. Вестник МЭИ, № 1, 1996.
5. Строев Н.Н. Исследование предельных возможностей использования новых магнитных материалов в высокочастотных источниках вторичного электропитания. Диссертация на соискание уч. степени к.т.н., Москва, 2000.
6. Глебов Б.А. Применение моделей процесса перемagnetизации ферромагнетиков при анализе электрических цепей. Электро-связь, № 6, 1998.
7. Глебов Б.А., Каюков Д.С., Недолужко И.Г. Модели магнитных компонентов. Практическая силовая электроника, № 11, 2003.
8. Недолужко И.Г., Каюков Д.С. Модификация PSpice-модели магнитного сердечника. Силовая электроника, № 1, 2005.
9. AccuSim II Models Reference Manual. Software Version 8.10.
10. ELDO User's Manual. Software Version 6.6_1 Release 2005.3.
11. Установка контроля магнитных параметров магнитопроводов в производственных условиях УКМП-0.05-100. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. НЛСД.411174.002.ТО. ЗАО «НИИСТТ» (г. Смоленск), 2010.
12. Лохов А., Филиппов А., Селиванов И., Работалюк А. САПР печатных плат: маршрут Expedition. Электроника: НТБ, № 2, 2004.
13. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры. Радио и связь, 1991.
14. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. Энергоатомиздат, 1991.
15. Семёнов Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов. СОЛОН-Р, 2001.



Новости мира News of the World Новости мира

Анализатор протоколов MIPI M-PHY для мобильных устройств

Компания Agilent Technologies Inc. представляет новый анализатор протоколов U4431A MIPI M-PHY для нового поколения приложений для мобильных устройств. Анонсируемый анализатор протоколов позволяет инженерам НИОКР и производственных отделов выполнять глубокий и качественный анализ данных разработок на базе MIPI M-PHY.

Функциональность современных мобильных устройств значительно превосходит возможности стационарных ПК. Разработчики мобильных устройств используют несколько высокоскоростных шин для управления несколькими камерами высокого разрешения, высокоскоростным периферийным оборудованием, усовершенствованными графическими адаптерами и объёмными буферами памяти. Постоянно возрастающая потребность в расширении пропускных каналов привела к расширению набора характеристик M-PHY, которые включают в себя средства четырёхполосной передачи данных на скорости в 6,0 Гб/с.



Анализатор U4431A обеспечивает объём анализа памяти до 16 Гб по каждой полосе, позволяя разработчикам захватывать десятые доли секунды системного трафика даже на таких высоких скоростях.

Помимо прочих функций анализатор U4431A может работать в режиме «Первичные данные», позволяя разработчикам анализировать коррелированные по времени данные 8b/10b, связанные с каждым протоколом. Статистика может отображаться в форме волнообразного графика или списка, обеспечивая наглядное представление процесса формирования пакета на физическом уровне.

Такие средства отображения данных также применимы к пакету протоколов M-PHY, позволяя выявлять ошибки от физического уровня до канала передачи данных и от транспортного уровня до высшего прикладного уровня. Таким образом, разработчики получают возможность отсле-

живать и получать данные в течение всего процесса их передачи.

Кроме того, анализатор U4431A предлагает мощные инструменты для выявления и определения характера событий на шине. Сигналы в режиме реального времени позволяют выявлять ошибки на каждом уровне протокола, фильтры помогают настраивать аналитические инструменты на определённые типы трафика, а обзоры трафика и маркеры измерений позволяют разработчикам оценивать трафик в различных объёмах – от целых пакетов данных до одной наносекунды.

Модульная форма AXIe анализатора U4431A позволяет пользователям выполнять одновременный анализ нескольких шин M-PHY. Шины M-PHY могут быть скоррелированы по времени с шинами MIPI D-PHY CSI-2 и DSI-1, PCIe®, DDR и HDMI или даже с модулями анализаторов быстродействующих логических схем. Разработчикам предлагаются решения, соответствующие актуальной потребности по количеству полос, объёму памяти и поддержке протоколов с возможностью последующего обновления.

www.agilent.com