

Модификация PSpice-модели магнитного сердечника

Предложена методика определения параметров PSpice-модели магнитного сердечника, позволяющая более точно определить эти параметры по справочным характеристикам. Предложены две модификации PSpice-модели для учета частотных свойств магнитных материалов с помощью постоянного и нелинейного сопротивлений. Дана методика определения параметров этих моделей.

**Игорь Недолужко,
к. т. н.**

nedol@orc.ru

Дмитрий Каюков

kajukov@mail.ru

Для численного моделирования электронных схем (в том числе и преобразовательных устройств) чаще всего используется пакет программ схемотехнического моделирования PSpice, входящий в систему OrCad [1]. Модель магнитного сердечника Джилса — Атертона [2], встроенная в эту систему, имеет два существенных недостатка. Во-первых, определение параметров модели Джилса — Атертона (ДАМ) с помощью пакета PSpice Model Editor (PSME), входящего в состав системы OrCad [1], по предельной петле гистерезиса $B(H)$ дает низкую точность при расчете потерь в сердечнике при амплитудах индукции, меньших предельной (насыщения). Во-вторых, ДАМ не учитывает частотные свойства сердечников и поэтому применима только на низких частотах.

Для повышения точности расчетов в работе [3] предлагается определять параметры ДАМ по экспериментальным характеристикам для различных амплитуд индукции непосредственно по математической модели, что очень громоздко. Для учета частотных свойств сердечников в работе [4] предлагается добавить соответствующую аппроксимацию непосредственно в ДАМ, что обычному пользователю PSpice не доступно.

В работе [6] рассмотрена достаточно точная модель сердечника, которую можно встроить в PSpice, а в [8] описана методика определения параметров этой модели в системе Mathcad [7]. К сожалению, эта модель сложна, описывается большим числом параметров, определение которых довольно сложно.

Назначение настоящей статьи — увеличить точность расчетов с применением ДАМ за счет некоторого усложнения определения параметров модели и учесть частотные свойства сердечника путем добавления к модели сопротивлений.

ДАМ описывается четырьмя параметрами магнитного материала (M_s , A , K и C) и четырьмя параметрами геометрии сердечника ($Area$, Gap , $Pack$ и $Path$), которые зависят от его типоразмера и конструкции. Параметры M_s , A , K и C обычно определяют по нескольким точкам справочной предельной петли гистерезиса $B(H)$ с помощью пакета PSME. Параметр M_s определяет предельный цикл перемагничивания

и пропорционален максимальной индукции насыщения B_{so} . Параметр $K = Hc$ определяет ширину предельной петли гистерезиса [3]. Параметр A определяет «резкость» изгиба спинки петли $B(H)$, а параметр C моделирует наклон безгистерезисной и начальной кривых намагничивания.

Отметим, что в PSME напряженность магнитного поля H указывается в эрстедах (Э), а магнитная индукция B — в гауссах (Гс). В справочных же данных H указывается в амперах на метр (А/м), а B — в теслах (Тл). Для пересчета нужно воспользоваться соотношениями $1 \text{ А/м} = 0,0125664 \text{ Э}$ и $1 \text{ Тл} = 10 \text{ кГс}$.

В качестве примера определим параметры ДАМ для магнитного сердечника U26/22/16 фирмы EPCOS, который выполнен на магнитном материале N27. Справочные данные на ферромагнетик марки N27 приведены в технической документации [5]. Помимо характеристики $B(H)$, снятой на низкой частоте (рис. 1), приводятся зависимости удельной мощно-

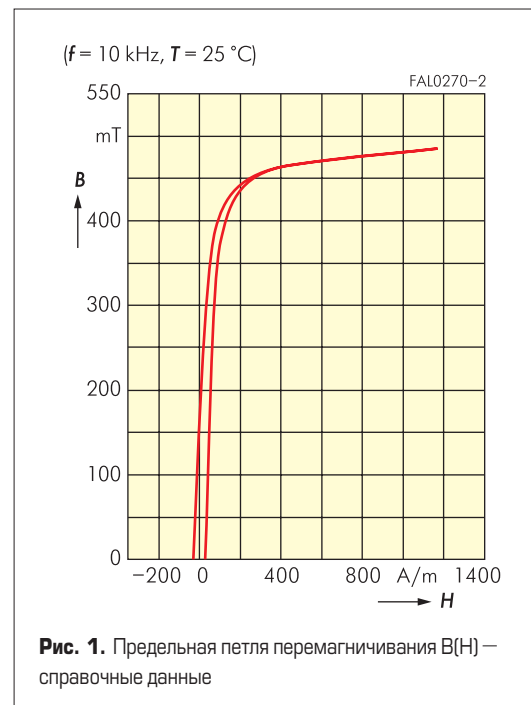
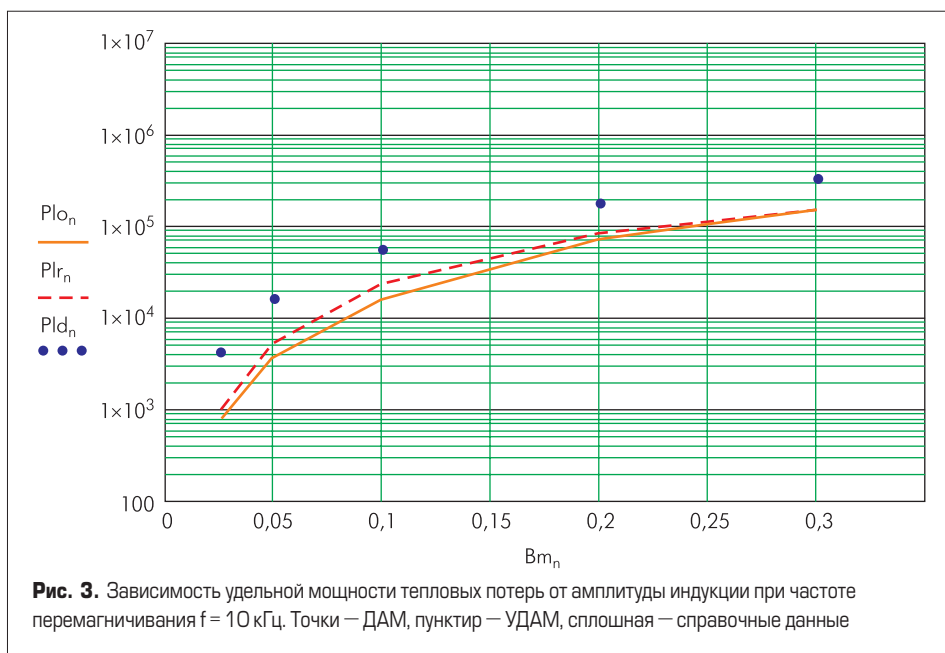
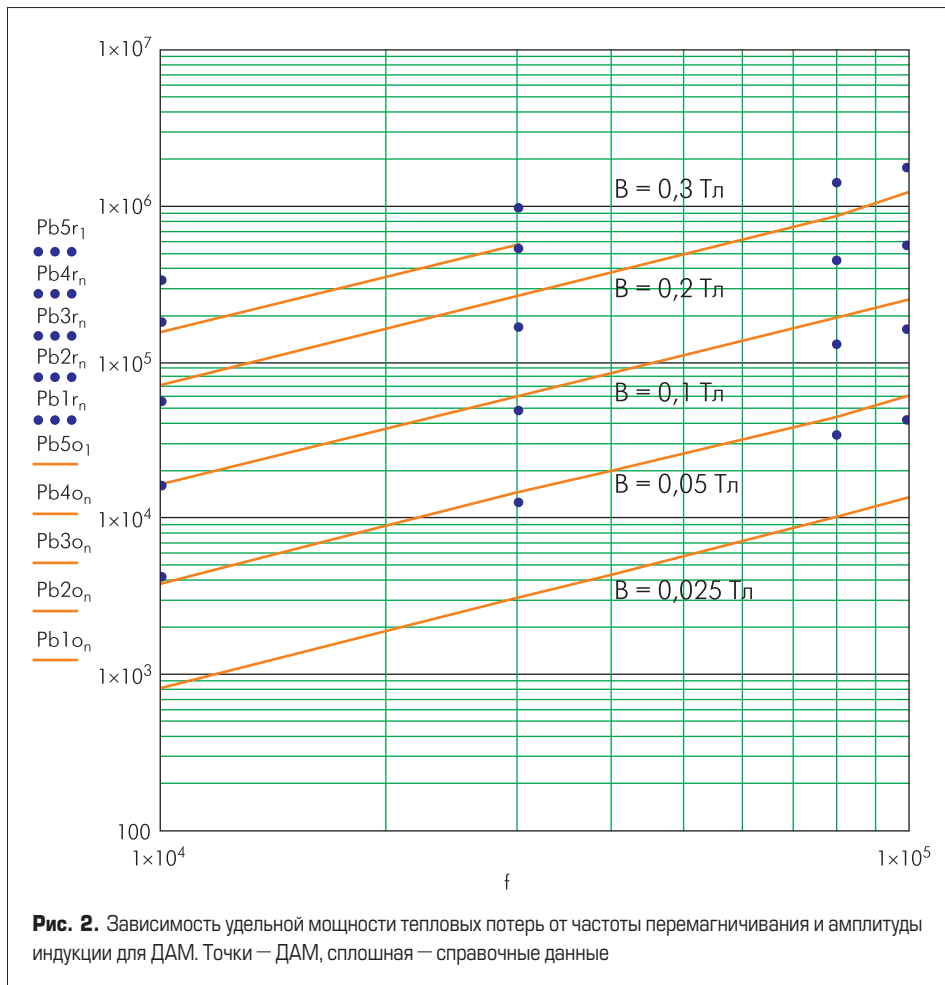


Рис. 1. Предельная петля перемагничивания $B(H)$ — справочные данные



сти тепловых потерь от частоты перемагничивания и амплитуды индукции (рис. 2).

Геометрические параметры сердечника следующие: площадь поперечного сечения магнитопровода $Area = 1,31$ см², средняя длина магнитной линии магнитопровода $Path = 9,8$ см. Остальные два параметра взяты по умолчанию (ширина немагнитного зазора $Gap = 0$ см, коэффициент заполнения окна сердечника обмотками $Pack = 1$), то есть магнитный сердечник не имеет зазора и его окно целиком заполнено обмотками. Число витков тестовой обмотки $W = 10$. Параметры определим для

частоты $f = 10$ кГц, для которой дана справочная характеристика $B(H)$. С помощью PSME определены параметры ДАМ: $Ms = 395430$, $A = 32,145$, $C = 0,08843$, $K = 33,272$. Рассчитанная по этим параметрам с помощью PSpice предельная петля $B(H)$ достаточно хорошо совпадает со справочной (текст программы приведен далее), однако расчетные характеристики $Po(f, Bm)$ (рис. 2) и $Po(Bm)$ (рис. 3) сильно отличаются от справочных.

Так, на рис. 3 при малых Bm расчетное значение превышает справочное в четыре раза, при $Bm = 0,3$ Тл — в два раза. Такое различие

характерно и для других типов магнитного материала [3], что связано с принятой в ДАМ аппроксимацией.

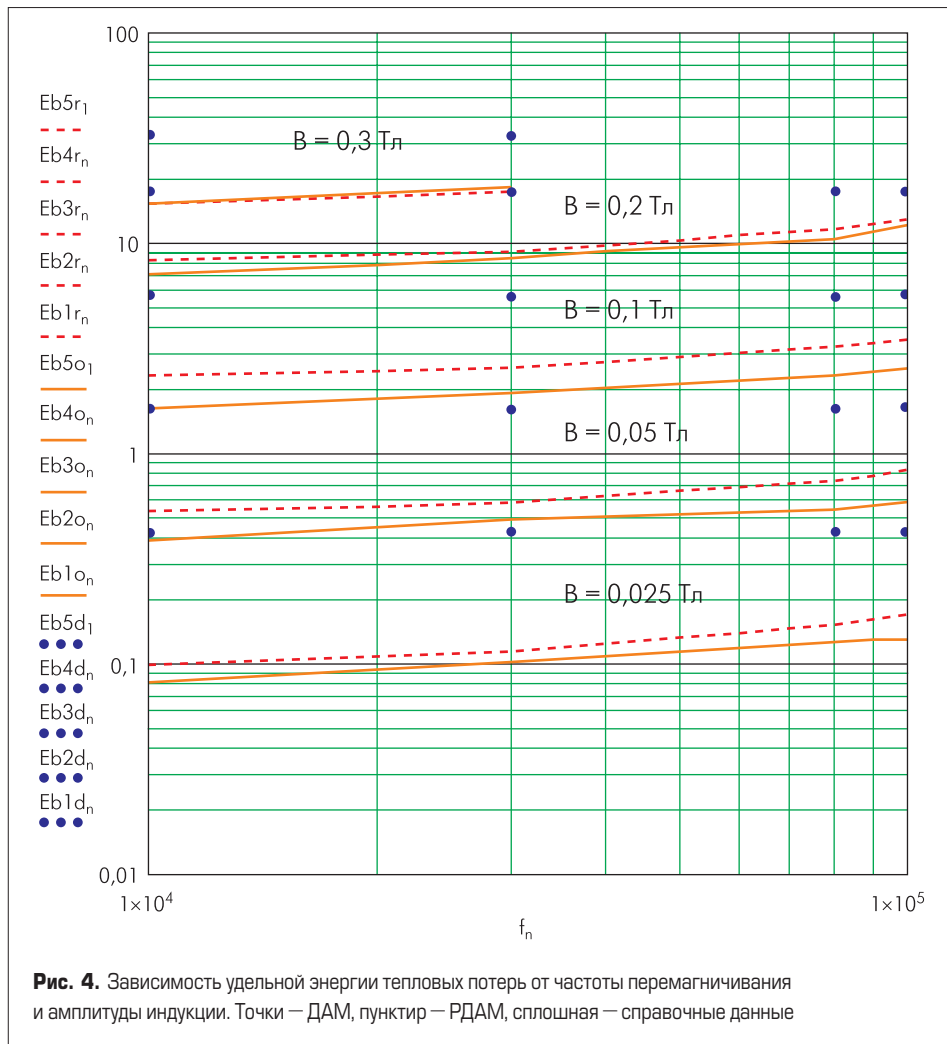
Для уменьшения погрешности расчета потерь с помощью ДАМ (при рабочих Bm примерно до $0,7 \cdot Bso$) предлагается следующая методика определения параметров. Вначале с помощью PSME производится расчет начальных значений параметров ДАМ. Параметр Ms оставляем неизменным (определяет Bso), а остальные параметры изменяем так, чтобы добиться совпадения справочной и расчетной характеристик $Po(Bm)$ (рис. 3). Для этого из справочных данных берем значение удельной мощности тепловых потерь $Po1$ при минимальном значении магнитной индукции $Bm1$ и частоты f , для которой дана гистерезисная магнитная характеристика $B(H)$. После этого с помощью программы PSpice производим расчет удельной мощности тепловых потерь $Pe1$ в сердечнике для тех же значений $Bm1$ и f .

Затем эти значения сравниваются и производится уточнение параметра K — он уменьшается или увеличивается во столько раз, во сколько значение $Po1$ меньше или больше $Pe1$. После этого с помощью PSpice производится расчет удельной мощности тепловых потерь $Pe2$ для значения $Bm2 > Bm1$ и сравнивается со справочными данными $Po2$. Если значение $Pe2$ больше или меньше $Po2$, то необходимо соответственно увеличить или уменьшить значение параметра C и заново произвести уточнение параметра K . В результате получаем следующие значения параметров ДАМ: $Ms = 3,95 \cdot 10^5$, $A = 32,145$, $K = 17$, $C = 0,32$. Запишем эти значения в PSpice-модель магнитного сердечника в директиву «MODEL».

Текст PSpice-программы тестовой схемы для проверки модели магнитного сердечника U26/22/16 записывается в виде

```
.Param Bm=0.025
.Param W=10
.Param Sc=1.31e-4
.Param F=10k
.Param Pi=3.14
.Param Va={2*Pi*F*Sc*W*Bm}
Vsin 100 0 sin (0 {Va} {F} )
Rin 100 15 1
L1 15 0 {W} ic={-Bm}
L2 10 0 {W}
Rr 10 0 100000
K2 L1 L2 0.99 N27
.MODEL N27 CORE (level=2 MS=395430 A=32.145 C=0.32 K=17
+ area=1.31 path=9.8)
.TRAN 1u 3.1m 3m 0.1u uic
.probe
.END
```

Здесь сначала в перечне параметров схемы задаются амплитуда индукции Bm (в Тл), число витков тестовой обмотки W , площадь сечения сердечника Sc (в квадратных метрах), частота перемагничивания F (в Гц), постоянная Pi . Выражение для амплитуды перемагничивающего напряжения указывается в фигурных скобках, так же, как и параметры Va и F в выражении $Vsin$. В модели дросселя $L1$, $L2$ обозначены обмотки дросселя, Rin — сопротивление обмотки $L1$, Rr — сопротивление нагрузки, $K2$ — сердечник на материале N27 с коэффициентом связи 0,99 между обмотками $L1$ и $L2$. Строго говоря, сопротивление обмотки Rin зависит от частоты перемаг-



ничивания и конструкции дросселя, однако здесь оно считается постоянным и берется достаточно большим для уменьшения времени установления переходного процесса и достаточно малым, чтобы падение напряжения на нем было намного меньше амплитуды V_a . Вторая обмотка L2, работающая на холостом ходу (на сопротивление 100 кОм), необходима из-за того, что в PSpice сердечник K обязательно должен связывать между собой минимум две индуктивности.

Заметим, что на низких частотах при перемагничивании сердечника как меандром, так и синусоидальным напряжением и при одинаковой амплитуде магнитной индукции потери мощности примерно одинаковы. В модели сердечника параметры $area$ и $path$ указываются в см² и см соответственно. В директиве .TRAN указываются шаг вывода данных, время окончания расчета (должно быть больше времени установления переходного процесса), время начала вывода данных (должно быть на период перемагничивания больше), максимальный шаг интегрирования.

Удельная энергия потерь E_o (в джоулях на кубический метр) рассчитывается в процессоре PROBE путем интегрирования за период перемагничивания мгновенной мощности: $s(i(Rin)*v(15))/V$, где $V = Area*Path*10^{-6}$. Удельная мощность $P_o = E_o*f$.

Модель с определенными таким образом параметрами назовем «УДАМ». На рис. 3 пунктиром показаны результаты расчетов по данной программе, а точками — результаты рас-

четов для исходных значений параметров сердечника, определенных в PSME (см. ранее). Заметим, что при больших значениях Bm (вблизи насыщения) ошибка расчетов по УДАМ увеличивается (в сторону занижения P_o). Для удобства сравнения расчетных характеристик со справочными данными перестроим справочные характеристики $P_o(f, Bm)$ в зависимость удельной энергии $E_o(f, Bm) = P_o(f, Bm)/f$ (см. рис. 4). Точками здесь показаны результаты моделирования на PSpice с применением ДАМ. Видно, что ДАМ не учитывает зависимость потерь от частоты.

В данной работе предлагается учитывать динамические свойства сердечников с помощью сопротивления R_d , которое включается параллельно ДАМ. При этом предполагается, что зависимость $E_o(f)$ линейная. Значение R_d можно определить из справочных данных на магнитный сердечник — из зависимости удельной мощности тепловых потерь от частоты перемагничивания и амплитуды индукции (рис. 2) или из перестроенных характеристик (рис. 4). Пусть сердечник перемагничивается синусоидальным напряжением с амплитудой V_a и частотой F . Тогда удельная энергия тепловых потерь в R_d :

$$E_{ro} = \frac{P_{ro}}{F} = \frac{V_a^2}{2 \times R_d \times F \times V} = \frac{2 \times \pi^2 \times Bm^2 \times W^2 \times Sc}{R_d \times l} \times F$$

Считая, что при изменении частоты все изменение E_o в сердечнике определяется потерями в R_d , получаем (при постоянном Bm)

$$R_d = \frac{2 \times \pi \times Bm^2 \times \Delta F}{\Delta E_o} \times \frac{Sc \times W^2}{l} \quad (1)$$

Определим R_d для магнитного сердечника U26/22/16 на материале N27. Из характеристик рис. 4 для диапазона частот 10–100 кГц и $Bm = 0,3$ Тл находим приращение E_o . С учетом $S = 131 \times 10^{-6} \text{ м}^2$, $W = 10$, $l = 98 \times 10^{-3}$ м из (1) получаем $R_d = 1,71 \times 10^3$ Ом. При меньших значениях Bm это сопротивление больше, но с некоторым завышением расчетных потерь его можно считать постоянным. PSpice-модель магнитного сердечника U26/22/16 в текстовом виде записывается так же, как для ДАМ, только параллельно индуктивности $L1$ нужно включить сопротивление R_d , то есть добавить строку:

Rd 150 1.71k

Назовем эту модель «РДАМ» и рассчитаем с помощью PSpice зависимость удельной энергии потерь от частоты перемагничивания и амплитуды индукции. На рис. 4 эти зависимости показаны штрихом в сравнении со справочными данными (сплошная линия) и ДАМ (точки).

Как видно из рисунка, точность расчета потерь по РДАМ гораздо выше, чем по ДАМ, и во всем диапазоне ошибка не более 30%. Однако при больших изменениях индукции B ошибка растет и для более точного учета динамических потерь в сердечнике необходимо учитывать зависимость сопротивления от B , введя эту зависимость аппроксимацией, как это сделано, например, в работе [8]:

$$R_d(B) = \frac{R_{do}}{1 + G \times \left(\frac{B}{B_{so}} \right)^D}$$

Здесь R_{do} , G , D , B_{so} — параметры аппроксимации. Параметр D должен иметь целое и четное значение, обычно $D = 2$ или 4 [8]. Параметр B_{so} введен для того, чтобы коэффициент G был безразмерным. Если это не важно, то проще принять

$$R_d(B) = \frac{R_{do}}{1 + Km \times B^D} \quad (2)$$

При синусоидальном напряжении с амплитудой V_a энергия потерь в таком сопротивлении (при $D = 2$)

$$E_r = \frac{V_a^2}{2 \times R_{do} \times F} \times \left(1 + \frac{Km \times Bm^2}{4} \right)$$

Подставляя выражение для V_a через Bm и F , и считая, что все увеличение потерь в сердечнике с увеличением частоты равно прираще-

нию потерь в этом сопротивлении, получаем формулу для приращения удельной энергии в сердечнике

$$\Delta E_o(B_m, R_{do}, K_m) = \frac{(2 \times \pi \times S_c \times W \times B_m)^2}{2 \times R_{do} \times V} \times \left(1 + \frac{K_m \times B_m^2}{4} \right) \times \Delta F$$

Определить параметры R_{do} и K_m этой аппроксимации можно с помощью блока Given — Minerr в системе MathCAD [7] по характеристикам рис. 4. Таким образом, для данного сердечника определены $D = 2$, $R_{do} = 3,6$ кОм, $K_m = 11,86$ (или $G = 2,78$ при $B_{so} = 0,484$ Тл). Для встраивания модифицированной модели Джилса — Атертона (МДАМ) в PSpice нужно параллельно ДАМ сердечника включить $R_d(B)$. В системе PSpice нелинейное сопротивление моделируется или нелинейным источником напряжения, зависящим от тока, или источником тока, зависящим от напряжения. Применим зависимый источник тока $G_{rm}(U, B) = U/R_d(B)$. Так как источник G_{rm} зависит от мгновенного значения B , то нужен датчик магнитной индукции B . Для этого воспользуемся соотношением:

$$U_\mu = S_c \times W \times \frac{dB}{dt}$$

Тогда, в качестве датчика магнитной индукции можно использовать ток индуктивности $L_b = S_c \times W$, к которой приложено то же напряжение, что и к сердечнику. При этом для данного сердечника текстовый PSpice-файл МДАМ будет состоять из текстового файла ДАМ, приведенного ранее, с добавленными к нему следующими операторами:

```
.Param Lb={Sc*W}
.Param Km=11.86
.Param Rdo=3.6k
Eb 105 0 15 0 1
Rb 105 107 1
Lb 107 106 {Sc*W}
Vb 106 0 dc 0
Grm 15 0 value={V(15,0)*(1+Km*PWR((I(Vb)),2))/Rdo}
```

Чтобы индуктивность L_b не шунтировала модель сердечника, она подсоединяется к зависимому источнику напряжения E_b , напряжение которого равно напряжению на сердечнике. Последовательно с индуктивностью должно обязательно включаться сопротивление R_b , а датчиком тока является ток через независимый источник напряжения V_b с нулевым напряжением. Применять МДАМ имеет смысл примерно при $B_m > 0,7 \times B_{so}$.

Рассмотренные модели РДАМ и МДАМ используются в моделях дросселей и трансформаторов при уточненном схмотехническом моделировании преобразовательных устройств на PSpice.

Литература

1. Разевиг В. Д. Система OrCAD 9.2 // М.: Солон-Р. 2001.
2. Jiles D. C., Atherton D. L. Theory of ferromagnetic hysteresis // Journal of magnetism and magnetic materials. 1986. Vol. 61. № 06.
3. Новиков А. А., Амелин С. А. Экспериментальное исследование параметров модели перемагничивания ферромагнетиков Джилса — Атертона // Электричество. 1995. № 9.
4. Амелин С. А., Новиков А. А и др. Расчет потерь в аморфных магнитных материалах с помощью модифицированной модели Джилса — Атертона. // Вестник МЭИ. 1996. № 1.
5. http://www.epcos.de/inf/80/db/fer_01/00310106.pdf.
6. Глебов Б. А. Применение моделей процесса перемагничивания ферромагнетиков при анализе электрических цепей // Электросвязь. 1998. № 6.
7. Дьяконов В. П. MathCAD 8/2000: Специальный справочник. СПб: Питер. 2000.
8. Глебов Б. А., Каюков Д. С., Недолужко И. Г. Модели магнитных компонентов // Практическая силовая электроника. 2003. № 11.