

Бесплатные версии программ расчета дросселя

с порошковым сердечником

Валентин Володин

Дроссели являются необходимым атрибутом любых импульсных источников питания и используются для ограничения величины переменного тока, сглаживания пульсаций постоянного тока, для накопления энергии, а также для создания различных резонансных контуров. При этом сердечник дросселя обычно работает в условиях сильного подмагничивания. Чтобы в этих условиях избежать насыщения сердечника, в него вводят немагнитный зазор. Конечно, немагнитный зазор позволяет избежать насыщения, но при этом сильно уменьшает магнитную проницаемость сердечника, а следовательно, и индуктивность дросселя, вынуждая увеличивать число витков в его обмотке. В свою очередь, для компенсации дополнительных ампервитков требуется увеличивать длину немагнитного зазора. Если бы индуктивность росла пропорционально количеству витков, то это была бы гонка без конца. На самом деле индуктивность растет пропорционально квадрату количества витков, что, в конце концов, позволяет найти компромисс между числом витков и длиной немагнитного зазора, увеличив габариты дросселя.

Возможно, наиболее часто встречаются дроссели, которые используются для сглаживания пульсаций переменного тока в составе различных L- и LC-фильтров импульсных преобразователей. В обмотке такого дросселя протекает ток, содержащий в себе, кроме переменной, постоянную составляющую, которая вызывает значительное одностороннее подмагничивание его сердечника. Но не все магнитные материалы ведут себя в этой ситуации одинаково. Одни, например железо, насыщаются при больших значениях индукции, а другие (такие как феррит), насыщаются при меньших. При этом, используя железный сердечник, можно сконструировать более компактный дроссель. Однако переменная составляющая тока в обмотке дросселя вызывает нагрев железного сердечника. Он, в основном, связан с токами Фуко, возникающими в сердечнике при его перемагничивании. Потери перемагничивания можно уменьшить, если разделить сердечник на отдельные листы и изолировать их друг от друга. Например, сердечники трансформаторов, работающих на частоте 50 Гц, выполнены из листового железа толщиной 0,35–0,5 мм. При увеличении рабочей частоты до 400 Гц нужно использовать еще более тонкое

железо (0,05–0,15 мм). В определенных условиях оно годится и для более высокой частоты. Однако в настоящее время тонкое трансформаторное железо вошло в разряд дефицита. Его трудно достать, и при этом оно слишком дорого стоит. Поэтому в дросселях различных фильтров приходится использовать ферриты, которые, по сравнению с железом, быстрее насыщаются, но при этом способны работать на более высоких частотах.

Хорошую альтернативу мелкошихтованному железу и особенно ферритам составляют порошковые сердечники (Powder Cores), которые состоят из мелких зерен ферромагнитного материала на основе железа или никеля, скрепленных между собой с помощью специального связующего диэлектрика, одновременно обеспечивающего электрическую изоляцию между отдельными зернами. По этой причине подобные магнитные материалы еще называют магнитодиэлектриками. Так как отдельные зерна порошка имеют незначительные размеры, то порошковые сердечники способны работать на достаточно высоких частотах, соизмеримых с рабочими частотами ферритов. При этом значение индукции насыщения порошковых сердечников в несколько раз превышает аналогичный параметр ферритовых (табл. 1).

Немагнитные зазоры 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 двустороннего намагничивания. Например, подобные условия возникают в сердечниках сглаживающих дросселей выпрямителей и корректоров коэффициента мощности, в сердечниках дросселей переменного тока, в сердечниках трансформаторов различных одноконтурных преобразователей и т. п.

Распределенный немагнитный зазор порошковых сердечников дает им определенные преимущества перед сосредоточенными зазорами классических магнитных. Дело в том, что в длинных сосредоточенных зазорах магнитное поле выходит за пределы сечения сердечника («выпучивается»), что приводит к уменьшению эффективной длины зазора, а также к увеличению уровня внешних полей. Поэтому, при прочих равных условиях, электромагнитные изделия на порошковых сердечниках более технологичны, а также

Таблица 1. Индукция насыщения магнитных материалов

Материал	Феррит	MPP	High Flux	Kool Mu	X Flux	Iron Powder
Bs, Тл	0,4	0,8	1,35	1,05	1,6	1,5

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 имеют различные названия у различных производителей. Например, названия Sendust (сендаст), альсифер и Kool Mц обозначают один и тот же магнитный материал, который производится из смеси 85% железного порошка, 6% алюминиевого порошка и 9% кремния. Такой состав обеспечивает низкие потери на высоких рабочих частотах. Названия Mo-пермаллой, прессперм и MPP также относятся к одному и тому же материалу, который производится из смеси порошков, состоящей из 79% никеля, 17% железа и 4% молибдена. Молибден-пермаллой имеет наименьшие среди всех порошковых материалов потери на вихревые токи и перемагничивание.

Некоторым препятствием широкому использованию порошковых сердечников является их сравнительно высокая стоимость. На общем фоне достаточно дешевыми являются сердечники на основе железного порошка (Iron Powder). Во многих случаях порошковое железо может стать недорогой альтернативой Mo-пермаллою, материалам High Flux и Kool Mц, а также ферритовым и аморфным сердечникам с зазором. Сравнительно современным (производится с 1975 г.) является материал High Flux, изготавливаемый из равных частей порошка железа и никеля, чем достигается высокая индукция насыщения. Новый высокотемпературный материал X Flux производится из смеси порошкового железа и 6,5% кремния. В отличие от порошкового железа, X Flux не подвержен термическому старению и имеет меньшие потери при более высокой индукции насыщения.

Программа Inductor Design Software

Стремясь облегчить использование своей продукции, производители обеспечивают потенци-



Рис. 1. Стартовая заставка программы Inductor Design Software

альных потребителей разнообразными справочными данными, методиками расчета, а также простейшими компьютерными программами.

Компания Micrometals [1] предлагает бесплатную программу Inductor Design Software, с помощью которой можно рассчитать основные типы дросселей, использующих сердечники из порошкового железа. Последняя версия этой программы доступна на сайте http://www.micrometals.com/software_index.html (на момент написания статьи была доступна версия за ноябрь 2009 г.). Программа работает под управлением операционной системы Windows и не требует установки. Для запуска достаточно дважды кликнуть мышью по строке исполняемого файла `MicroRelease_Nov2009.exe`, после чего откроется стартовая заставка (рис. 1), а затем (после щелчка мышью по этой заставке) главное окно программы (рис. 2).

В главном окне расположены 12 кнопок, предоставляющих доступ к расчетным и дополнительным функциям программы.

Функции автоматического расчета

Посредством кнопок можно перейти к следующим функциям автоматического расчета (Automatic design functions):

- DC Biased — расчет дросселя фильтра, в обмотке которого протекает постоянный ток, вызывающий одностороннее подмагничи-

вание сердечника, а также присутствует небольшая переменная составляющая тока.

- Controlled swing — то же, но здесь индуктивность дросселя не должна превышать указанного максимального значения при уменьшении величины тока подмагничивания.
- Wide swing — то же, но здесь индуктивность дросселя должна соответствовать двум определенным значениям для двух значений тока подмагничивания. Если при этом индуктивность меняется незначительно, то пользователю предлагается использовать порошковое железо. В противном случае предлагается использовать сердечники, составленные из ферритового и порошкового.
- PFC boost — расчет дросселя для повышающего преобразователя корректора коэффициента мощности (ККМ). При вычислении потерь учитываются особенности работы корректора мощности.
- 60Hz — расчет низкочастотного дросселя переменного тока, в обмотке которого отсутствует постоянная составляющая тока.
- Resonant — расчет высокочастотных дросселей, работающих на определенной частоте резонанса. Выбор материала сердечника автоматически ограничен смесями 2, 8 и 18.

При нажатии любой из этих кнопок вызывается соответствующее окно функции, которое имеет информационные поля для ввода исходных расчетных данных. Рассмотрим структуры этих полей.

Вид окна функции **DC Biased** показан на рис. 3. Окно содержит следующие информационные поля:

- Inductance At Max Current — индуктивность при максимальном токе, мкГн;
- Maximum DC Resistance — максимальное сопротивление обмотки дросселя для постоянного тока (указывать не обязательно), Ом;
- Maximum Current — максимальный постоянный ток в обмотке дросселя, А;
- Switch Mode Inductor ON Voltage — напряжение, приложенное к обмотке дросселя в замкнутом состоянии силового ключа, В;
- Switch Mode Inductor OFF Voltage — напряжение, приложенное к обмотке дросселя в разомкнутом состоянии силового ключа, В;

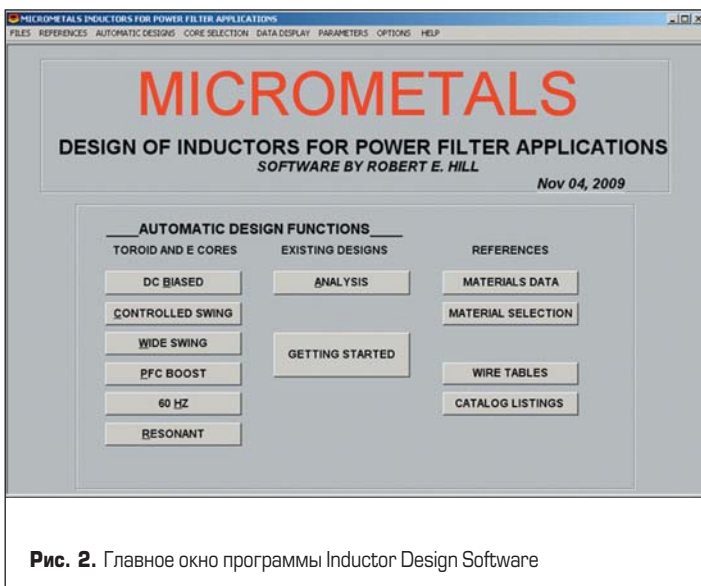


Рис. 2. Главное окно программы Inductor Design Software

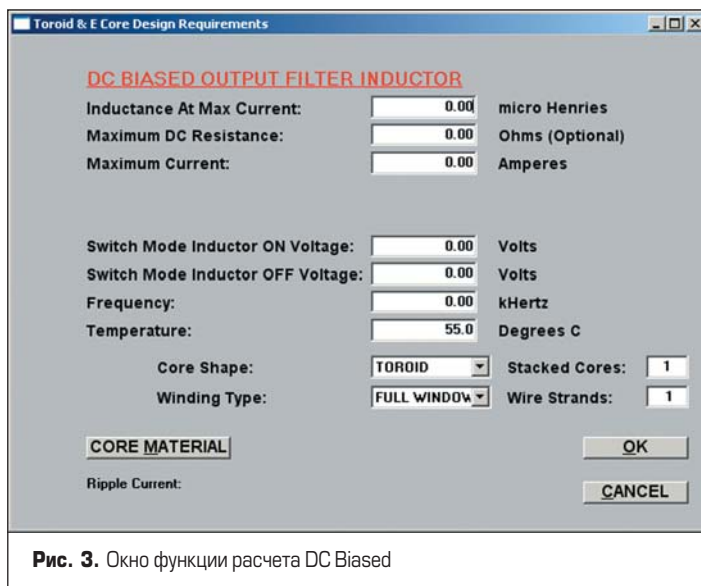


Рис. 3. Окно функции расчета DC Biased

- Frequency — частота коммутации силового ключа, кГц;
 - Temperature — температура окружающей среды, °C;
 - Core Shape — выбрать конфигурацию сердечника:
 - Toroid — кольцевой сердечник;
 - E-core — Ш-образный сердечник;
 - Composite — составной сердечник;
 - Winding Type — выбрать степень заполнения окна сердечника обмоткой:
 - Full Window — обмотка занимает 80% площади окна. При этом диаметр отверстия, не занятого обмоткой, составляет 45% от диаметра окна сердечника. Для Ш-образных сердечников обмотка полностью занимает окно сердечника;
 - Single Layer — обмотка намотана в один слой и полностью использует длину отверстия сердечника;
 - Stacked Cores — количество используемых сердечников. Если дроссель невозможно изготовить из одного сердечника, то он собирается из нескольких аналогичных, сложенных вместе;
 - Wire Strands — количество проволочек, составляющих провод обмотки дросселя. Используется, если получается слишком большой диаметр провода или для создания литцендрата;
 - Core Material — нажав эту кнопку, можно перейти к окну выбора смесей порошковых сердечников, используемых при расчете;
 - Ripple Current — двойная амплитуда пульсации (от пика до пика) переменной составляющей тока в обмотке дросселя. Это значение вычисляется программой.
 - OK — запустить процесс расчета дросселя;
 - Cancel — отменить процесс расчета дросселя.
- Окна остальных функций во многом похожи, но имеют несколько дополнительных информационных полей. Например, **Controlled swing**, **Wide swing** и **60 Hz** содержат дополнительные поля:
- Inductance At Min Current — индуктивность при минимальном токе, мкГн;
 - Minimum Current — минимальный постоянный ток в обмотке дросселя, А.
- В окне функции **PFC boost** можно дополнительно увидеть:
- Peak Regulator Input Voltage — амплитудное значение входного напряжения ККМ, В;
 - Regulator DC Output Voltage — постоянное напряжение на выходе ККМ, В.
- Окно функции **Resonant** дополнительно содержит:
- Peak Current — амплитудное значение тока в обмотке дросселя, А;
 - Peak Voltage — амплитудное значение напряжения на обмотке дросселя, В.

Дополнительные функции

К дополнительным функциям программы можно получить доступ при помощи кнопок:

- Analysis — анализ результатов расчета;
- Getting Started — краткое руководство по быстрому освоению программы;
- Materials Data — различные графические данные порошковых магнитных материа-

лов. После щелчка по этой кнопке появляется выпадающее меню:

- Initial Perm vs DC Bias — функциональная зависимость начальной магнитной проницаемости от подмагничивания постоянным током;
- Percent Initial Perm vs DC Bias — функциональная зависимость относительной магнитной проницаемости (в процентах от начальной) от подмагничивания постоянным током;
- Percent Initial Perm vs AC Flux Density — функциональная зависимость начальной магнитной проницаемости (в процентах от начальной) от амплитуды переменной магнитной индукции;
- Effective Perm vs Frequency — функциональная зависимость эффективной проницаемости от частоты;
- Core Loss @ 1 kHz — функциональная зависимость потерь перемагничивания от амплитуды переменной магнитной индукции (для частоты 1 кГц);
- Core Loss @ 100 kHz — функциональная зависимость потерь перемагничивания от амплитуды переменной магнитной индукции (для частоты 100 кГц);
- Material Selection — нажав эту кнопку, можно перейти к окну выбора допустимых смесей порошковых сердечников;
- Wire Tables — таблицы различных полезных данных для круглого и квадратного обмоточного провода (доступно после внесения умеренной оплаты);
- Catalog Listings — отображение свойств сердечников в табличной форме (доступно после внесения умеренной оплаты).

Панель меню

В верхней части главного окна программы находится панель, на которой расположены меню:

- Files — практически все пункты этого меню доступны только после умеренной оплаты.
- References — справочная информация. Пункты этого меню рассматривались ранее.
- Automatic Designs — автоматический расчет. Пункты этого меню рассматривались ранее.

- Core Selection — выбор сердечников, используемых при расчете.
- Data Display — отображение результатов расчета:
 - Electrical and Dimensions — представленные электрических и размерных данных в виде таблицы.
 - % Perm vs DC Bias — функциональная зависимость относительной магнитной проницаемости (в процентах от начальной) от подмагничивания постоянным током. График приводится для используемого сердечника.
 - % Perm vs AC Flux — функциональная зависимость начальной магнитной проницаемости (в процентах от начальной) от амплитуды переменной магнитной индукции. График приводится для используемого сердечника;
 - Inductance vs Current — функциональная зависимость индуктивности от подмагничивания постоянным током. График приводится для используемого сердечника.
 - Loss vs AGE — потери в функции старения. Если потери в процессе старения возрастают незначительно, то выдается сообщение Design Exhibits negligible Core Loss (Расчет показывает незначительный рост потерь).
 - Temperature vs AGE — температура в функции старения. Если температура в процессе старения возрастает незначительно, выдается то же сообщение, что и в предыдущей функции.
- Parameters — параметры расчета. После выбора этого пункта меню появляется окно Design Parameters, в котором можно посмотреть и изменить следующие значения (рис. 4):
 - Maximum Temperature Rise — максимальный рост температуры сердечника по отношению к температуре окружающей среды, °C.
 - Minimum Copper Area — минимальное сечение медного провода, отведенное на 1 А тока, мм²/А.
 - Maximum Current Density — максимальная плотность тока, А/мм².

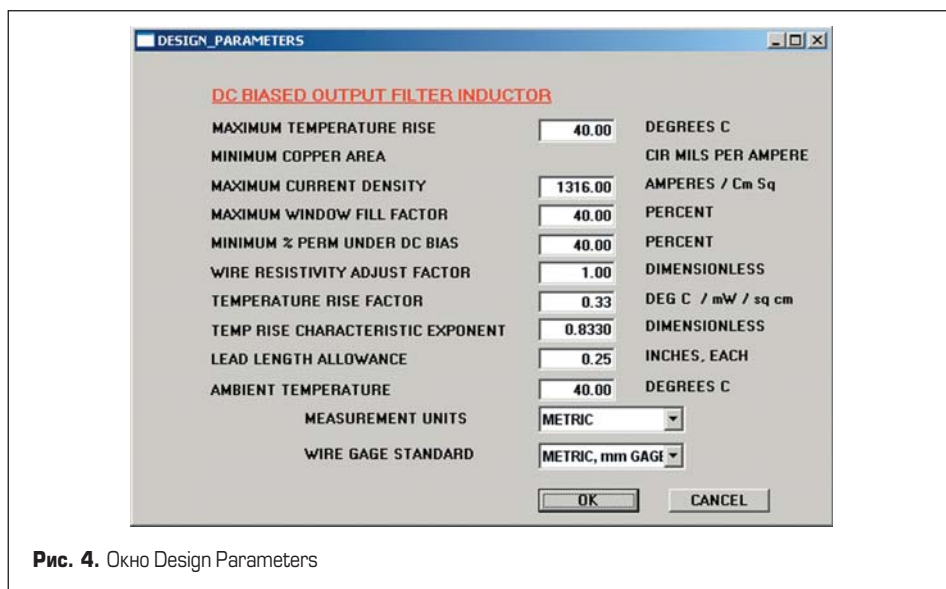


Рис. 4. Окно Design Parameters

Таблица 2. Перевод AWG и SWG в миллиметры

Калибр провода	Диаметр провода, мм		Калибр провода	Диаметр провода, мм	
	AWG	SWG		AWG	SWG
0000	11,68	10,16	19	0,91	1,02
000	10,41	9,45	20	0,81	0,92
00	9,27	8,84	21	0,72	0,81
0	8,25	8,23	22	0,64	0,71
1	7,35	7,62	23	0,57	0,61
2	6,54	7,01	24	0,51	0,56
3	5,83	6,4	25	0,45	0,51
4	5,19	5,89	26	0,4	0,46
5	4,62	5,38	27	0,36	0,41
6	4,11	4,88	28	0,32	0,38
7	3,66	4,47	29	0,29	0,35
8	3,26	4,06	30	0,25	0,305
9	2,9	3,66	31	0,23	0,29
10	2,59	3,25	32	0,2	0,27
11	2,3	2,95	33	0,18	0,254
12	2,05	2,64	34	0,16	0,229
13	1,83	2,34	35	0,14	0,203
14	1,63	2,03	36	0,13	0,178
15	1,45	1,83	37	0,11	0,17
16	1,29	1,63	38	0,1	0,15
17	1,15	1,42	39	0,09	0,127
18	1,02	1,22	40	0,08	0,11

- Maximum Window Fill Factor — максимальный коэффициент заполнения окна, %.
- Minimum % Perm Under DC Bias — минимальное относительное значение проницаемости, вызванное подмагничиванием сердечника, %.
- Wire Resistivity Adjust Factor — показатель настройки удельного сопротивления провода по отношению к сопротивлению меди. Допустимый диапазон изменения этого коэффициента 0,9–1,1 (при провер-

ке не замечено, чтобы этот коэффициент оказывал какое-то влияние на результаты расчета).

- Temperature Rise Factor — температурный коэффициент, °C/(мВт·см²). Этот показатель позволяет учитывать влияние реальных условий охлаждения, если они отличаются от принятого по умолчанию естественного. Например, если используется принудительное воздушное охлаждение и скорость потока равна 5 м/с,

Таблица 3. Исходные данные для расчета дросселя ЭРСТ

Наименование параметра	Значение
Минимальный ток, А	10
Максимальный ток, А	315
Максимальное входное напряжение, В	80
Напряжение дуги для максимального тока, В	32,6
Индуктивность при минимальном токе, мкГн	30

то температурный коэффициент можно снизить в три раза (0,33).

- Temp Rise characteristic exponent — показатель степени в формуле вычисления повышения температуры поверхности дросселя. По умолчанию 0,833.
- Lead Length Allowance — длина каждого вывода дросселя, дюйм.
- Ambient Temperature — температура окружающей среды, °C.
- Measurement units — система измерения:
 - English — английская;
 - Mixed English — смешанная английская;
 - Metric — метрическая.
- Wire Gage Standard — стандарт измерения провода:
 - American AWG — американский, AWG¹;
 - British SWG — английский, SWG²;
 - Metric, mm Gage — метрический.
 Диаметр провода указывается в мм.
- OK — подтвердить измененные параметры расчета.
- Cancel — отменить все изменения в параметрах расчета.
- Options — это меню не активно.
- Help — вызывает выпадающее меню из двух пунктов:
 - About — информация о программе;
 - Help Topics — краткое описание программы.

Если в параметрах расчета установлен американский или английский стандарт измерения провода, то перевести их в миллиметры поможет таблица 2.

Пример расчета дросселя

Например, рассчитаем дроссель фильтра электронного регулятора сварочного тока ЭРСТ. Исходные данные для расчета перечислены в табл. 3.

Дроссель работает с постоянным подмагничиванием и поэтому, чтобы приступить к его расчету, щелкнем по кнопке DC Biased в главном окне программы (рис. 2). Окно расчета дросселя DC Biased Output Filter Inductor (дроссель выходного фильтра постоянного тока) с заполненными полями изображено на рис. 5.

Предварительно необходимо снизить до величины 0,33 значение температурного коэффициента, который находится в меню Parameters/Temperature Rise Factor. После

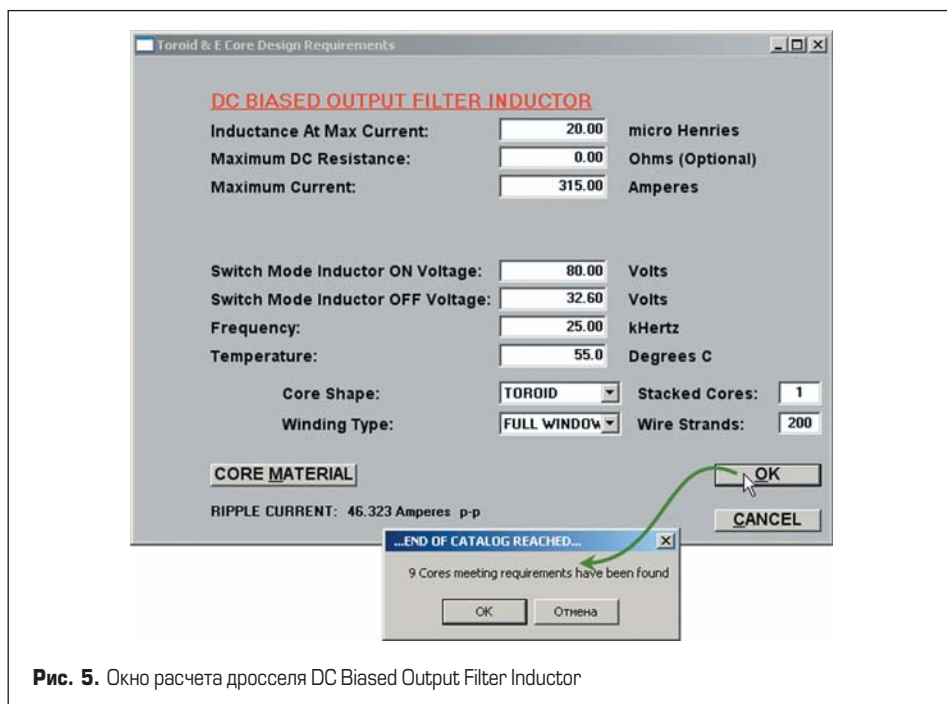


Рис. 5. Окно расчета дросселя DC Biased Output Filter Inductor

¹AWG — American wire gauge (Американский сортамент для проволоки)
²SWG — Standard wire gauge (Стандартный сортамент для проволоки)

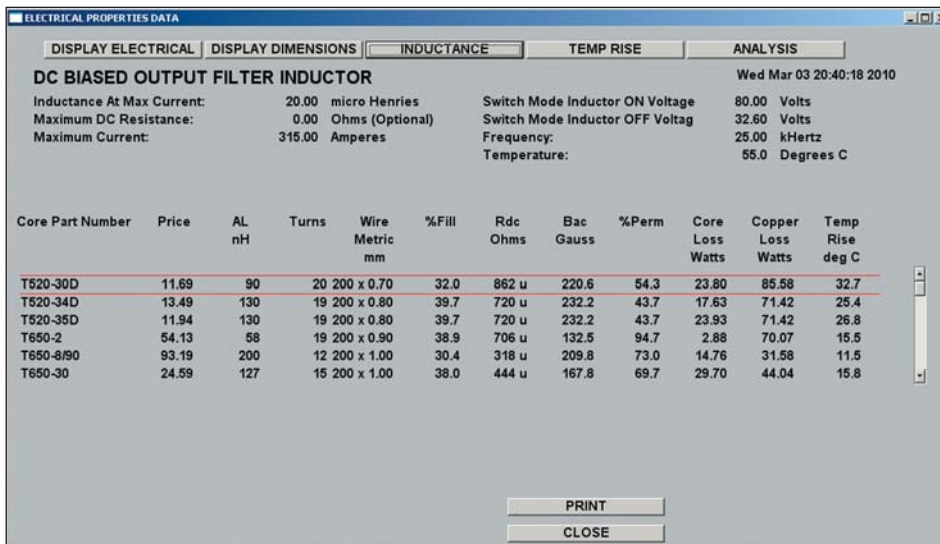


Рис. 6. Окно с результатами расчета дросселя

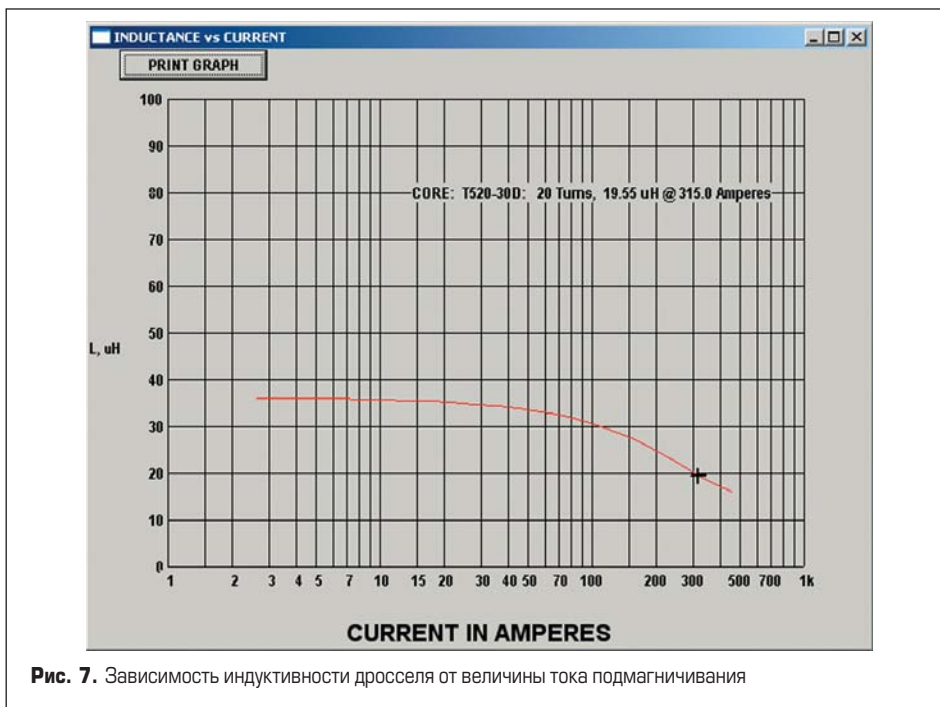


Рис. 7. Зависимость индуктивности дросселя от величины тока подмагничивания

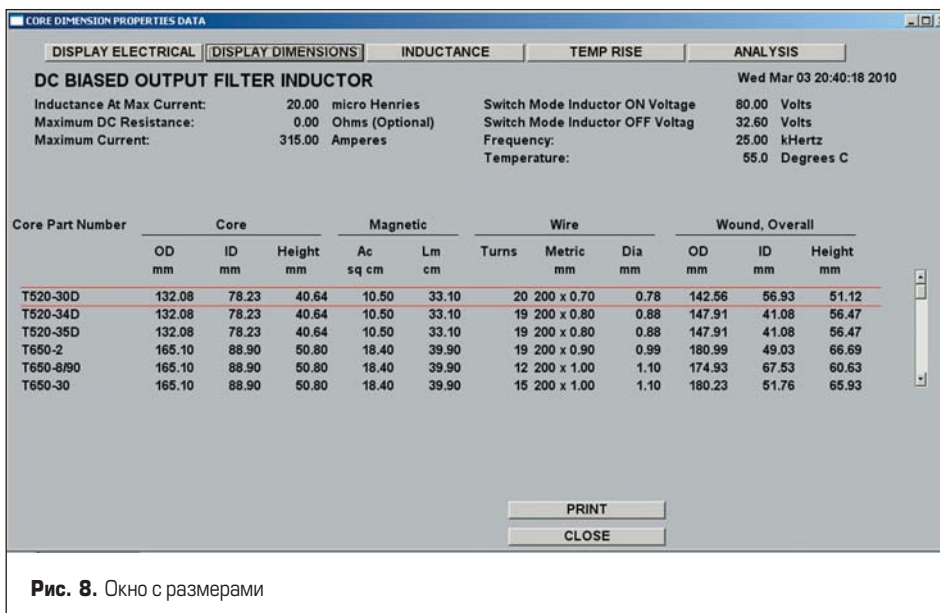


Рис. 8. Окно с размерами

Таблица 4. Результаты расчета дросселя фильтра

Наименование параметра	Значение
Core Part Number (номер сердечника)	T520-30D
Price (стоимость), долл.	11,69
Al (индуктивность одного витка), нГн	90
Turns (количество витков)	20
Wire Metric (диаметр провода), мм	200x0,7
%Fill (коэффициент заполнения окна), %	32
Rdc (сопротивление постоянному току), Ом	0,000862
Bac (переменная составляющая индукции), Гс	220,6
%Perm (проницаемость по отношению к начальной), %	54,3
Core Loss (потери в сердечнике), Вт	23,8
Copper Loss (потери в проводе), Вт	85,58
Temp Rise (повышение температуры), °C	32,7

того как все поля заполнены, щелкнем по кнопке ОК. В результате появится окно подсказки, в котором написано, что в результате расчета подобрано 9 подходящих вариантов (рис. 5). Щелкаем по кнопке ОК в окне подсказки и попадаем в окно с результатами расчета (рис. 6).

Выбираем наиболее дешевый вариант (price 11,69) на сердечнике T520-30D. Результаты расчета сведены в таблице 4.

В верхней части окна результатов расчета (рис. 6) расположены кнопки, позволяющие выводить дополнительную информацию:

- Display Electrical — показать окно с результатами электрического расчета. Это окно открыто по умолчанию.
 - Display Dimensions — показать различные размеры.
 - Inductance — вывести график зависимости индуктивности дросселя от величины тока подмагничивания (рис. 7). Крестиком отмечена индуктивность, соответствующая максимальному току. При этом видно, что на минимальном токе индуктивность дросселя превышает минимально необходимые 30 мкГн;
 - Temp Rise — вывести график роста температуры, вызванного старением сердечника.
 - Analysis — анализ результатов расчета.
- После нажатия кнопки **Display Dimensions** в окно выводятся различные размеры (рис. 8):
- Core (размеры сердечника):
 - OD — внешний диаметр сердечника, мм;
 - ID — диаметр окна сердечника, мм;
 - Height — высота сердечника, мм.
 - Magnetic (магнитные показатели):
 - Ac — сечение сердечника, см²;
 - Lm — средняя длина магнитной силовой линии, см.
 - Wire (размеры провода):
 - Turns — количество витков;
 - Metric — количество отдельных проволок и диаметр одной проволоки обмотки (если обмотка мотается одним проводом, то указывается только его диаметр);
 - Dia — диаметр отдельной проволоки с учетом толщины изоляции.
 - Wound, Overall (размеры дросселя с намотанной обмоткой):

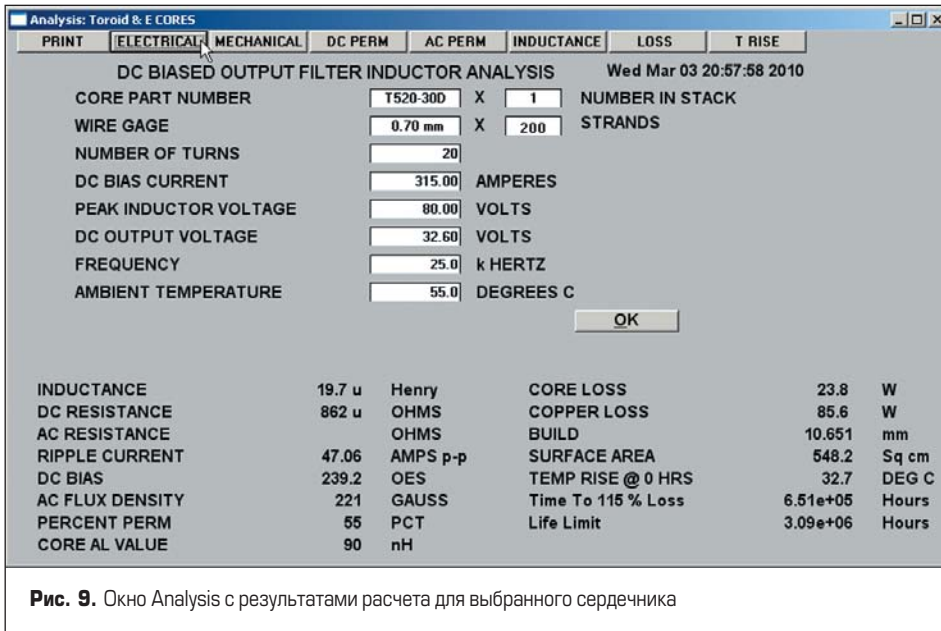


Рис. 9. Окно Analysis с результатами расчета для выбранного сердечника

- OD — внешний диаметр дросселя, мм;
- ID — диаметр окна дросселя, мм;
- Height — высота дросселя, мм.

Полную информацию о расчете можно получить с помощью кнопки **Analysis**. После нажатия этой кнопки появляется соответствующее окно, в которое сведены исходные данные, а также результаты расчета для выбранного сердечника (рис. 9).

В верхней части окна **Analysis** находится ряд кнопок, позволяющих выводить различную информацию, а также распечатать результаты расчета:

- Print — распечатать на принтере исходные данные, а также электрические и размерные результаты расчета для выбранного сердечника.
- Electrical — вывести в окно Analysis исходные данные, а также электрические результаты расчета для выбранного сердечника.
- Mechanical — вывести в окно Analysis исходные данные, а также размерные (механические) результаты расчета для выбранного сердечника.
- DC Perm — отобразить в отдельном окне зависимость магнитной проницаемости от

напряженности постоянного магнитного поля в сердечнике. Магнитная проницаемость отображается в процентах относительно начальной. Напряженность в сердечнике измеряется в эрстедах³.

- AC Perm — отобразить в отдельном окне зависимость магнитной проницаемости для переменной индукции в сердечнике. Магнитная проницаемость отображается в процентах относительно начальной. Размах магнитной индукции в сердечнике измеряется в гауссах (Гс⁴).
- Inductance — отобразить в отдельном окне зависимость индуктивности дросселя от тока в его обмотке.
- Loss — отобразить в отдельном окне рост потерь в сердечнике по мере его старения.
- T Rise — отобразить в отдельном окне рост температуры сердечника по мере его старения.

Программа **Magnetics Inductor Design Using Powder Cores**

Компания Magnetics [2] предлагает бесплатную программу **Magnetics Inductor Design Using Powder Cores**, с помощью которой можно рассчитать основные типы дросселей, использующих различные порошковые сердечники производства этой компании. Последнюю версию этой программы можно скачать по адресу http://www.mag-inc.com/design/software/inductor_design. Программа работает под управлением операционной системы Windows. Для установки программы необходимо скачать и запустить файл Setup3.msi. Сама установка особых проблем не вызывает. После установки ярлык программы **Magnetics Inductor Design Using Powder Cores** будет расположен в папке **Пуск/Программы/Magnetics Design Programs**. Для запуска программы достаточно щелкнуть по нему левой кнопкой мышки. После этого откроется окно программы (рис. 10).

Окно программы разделено на четыре области:

- Design inputs — исходные данные, требуемые для расчета:
 - DC Current — максимальный постоянный ток, протекающий по обмотке дросселя, А;
 - Ripple Current — двойная амплитуда пульсации тока дросселя (рис. 11), А;
 - Frequency — частота коммутации силового ключа преобразователя, кГц;
 - Current Density — допустимая плотность тока в обмотке дросселя, А/см²;
 - Full Load L — индуктивность при максимальном токе в обмотке дросселя, мкГн;
 - No Load L — индуктивность в отсутствие тока в обмотке дросселя, мкГн;

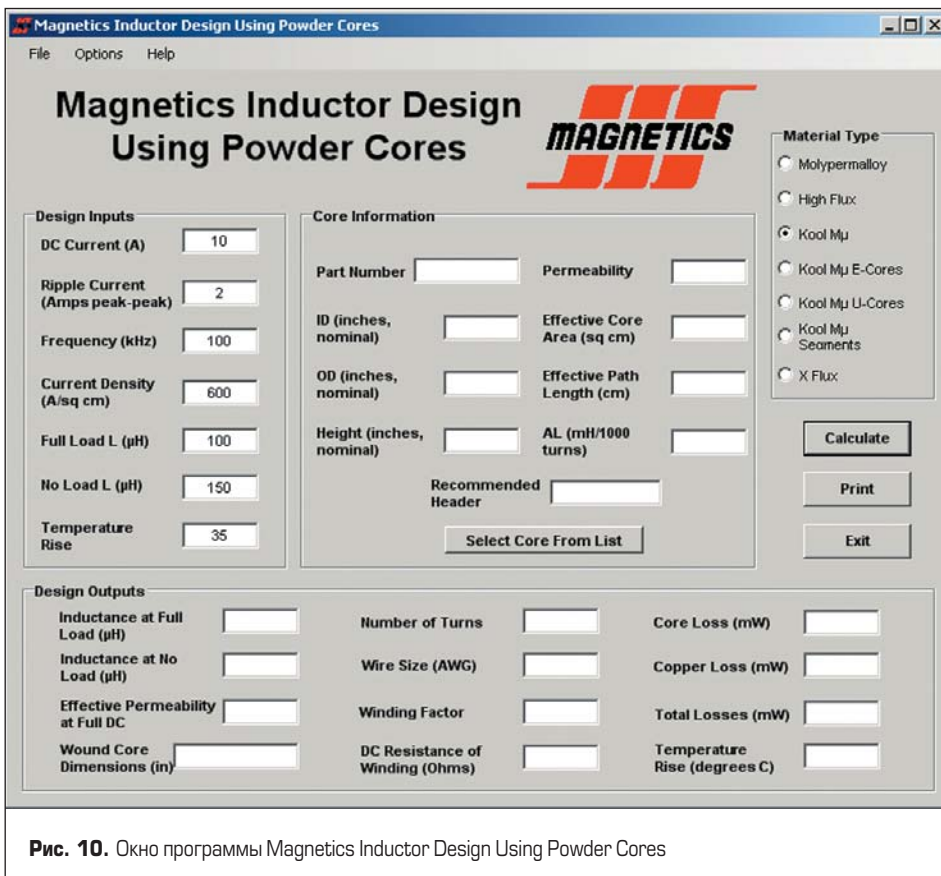


Рис. 10. Окно программы Magnetics Inductor Design Using Powder Cores

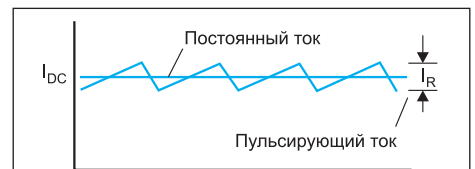


Рис. 11. Составляющие тока дросселя

³эрстед – единица СГС для измерения напряженности магнитного поля. 1 эрстед составляет 79,577 А/м.
⁴Гс – единица СГС для измерения магнитной индукции. 1 Тл = 10000 Гс.

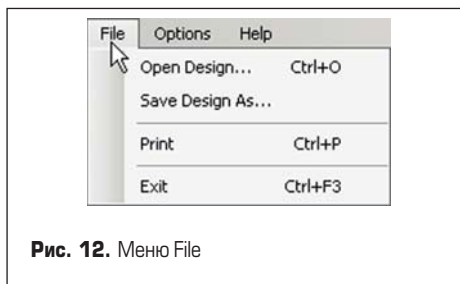


Рис. 12. Меню File

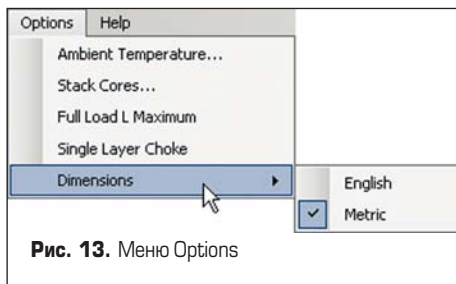


Рис. 13. Меню Options

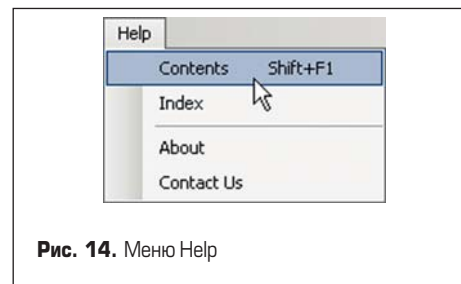


Рис. 14. Меню Help

– Temperature Rise — повышение температуры дросселя относительно температуры окружающей среды, °С.

• Core Information — данные сердечника, использованного для расчета дросселя.

Для кольцевого сердечника:

- Part Number — номер сердечника по каталогу производителя;
- ID — диаметр окна сердечника, дюйм/мм;
- OD — внешний диаметр сердечника, дюйм/мм;
- Height — высота сердечника, дюйм/мм;
- Recommended Header — номер поставки из каталога производителя.

Для Ш- и П-образных сердечников:

- Length of Core Set — длина сердечника, размер А, дюйм/мм;
- Width of Core Set — ширина сердечника, удвоенный размер В, дюйм/мм;
- Height of Core Bobbin — высота катушки сердечника, размер Е, дюйм/мм;
- Bobbin Part Number — номер катушки из каталога производителя;
- Permeability — начальная магнитная проницаемость;
- Effective Core Area — реальное сечение сердечника без учета защитного покрытия, см²;
- Effective Path Length — средняя длина магнитной силовой линии, см;
- AL — показатель индуктивности, мГн/1000 витков;
- Select Core From List — выбрать сердечник из списка доступных.

• Material Type — в этой области можно выбрать тип материала сердечника, используемого при расчете:

- Molypermalloy — кольцевые сердечники из молибден-пермаллоя (МРР);
- High Flux — кольцевые сердечники из High Flux;
- Kool Mμ — кольцевые сердечники из альсифера;
- Kool Mμ E-Cores — Ш-образные сердечники из альсифера;
- Kool Mμ U-Cores — П-образные сердечники из альсифера;
- Kool Mμ Segments — сегментные сердечники из альсифера;
- X Flux — кольцевые сердечники из X Flux.

• Design Outputs — результаты расчета:

- Inductance at Full Load — индуктивность при максимальном токе в обмотке дросселя, мГн;
- Inductance at No Load — индуктивность в отсутствие тока в обмотке дросселя, мГн;
- Effective Permeability at Full DC — реальная проницаемость сердечника при максимальном токе в обмотке дросселя;

– Wound Core Dimensions — габаритные размеры дросселя с обмоткой, дюйм/мм;

– Number of Turns — количество витков обмотки дросселя;

– Wire Size (AWG) — калибр провода (табл. 2);

– Winding Factor — коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой;

– DC Resistance of Winding — сопротивление обмотки дросселя для постоянного тока, Ом;

– Core Loss — потери в сердечнике дросселя, Вт;

– Copper Loss — потери в обмотке дросселя, Вт;

– Total Losses — суммарные потери, Вт;

– Temperature Rise — повышение температуры дросселя относительно температуры окружающей среды, °С.

В верхней части окна расположены меню:

• File — файловые операции (рис. 12):

- Open Design или <Ctrl+O> — открыть ранее сохраненный проект (не работает);
- Save Design As — сохранить проект под указанным именем;
- Print или <Ctrl+P> — распечатать результаты расчета;
- Exit или <Ctrl+F3> — выйти из программы.

• Options — различные параметры настройки программы (рис. 13):

- Ambient Temperature — температура окружающей среды;
- Stack Cores — количество сердечников, составляющих сердечник дросселя;

– Full Load L Maximum — максимальная индуктивность при полной нагрузке (не производит заметного действия);

– Single Layer Choke — использовать только один слой в катушке дросселя;

– Dimensions — установить систему измерения. Если выбрана система измерения English, то все размеры выводятся в дюймах. Если система измерения Metric, то все размеры выводятся в мм.

• Help — помощь (рис. 14):

- Contents или <Shift+F1> — содержание помощи;
- Index — указатель помощи;
- About — информация о текущей версии программы (при подготовке статьи использовалась версия PCD-4.0);
- Contact Us — контактная информация.

В правой части окна программы расположены три кнопки:

- Calculate — запустить расчет дросселя;
- Print — распечатать результаты расчета;
- Exit — выйти из программы.

Пример расчета дросселя

Например, рассчитаем дроссель фильтра для инверторного сварочного источника. Исходные данные перечислены в табл. 5.

Окно программы **Magnetics Inductor Design Using Powder Cores** с заполненными исходными данными изображено на рис. 15.

Перед началом расчета необходимо выбрать метрическую систему измерения в меню **Options** (рис. 15). После того как все поля за-

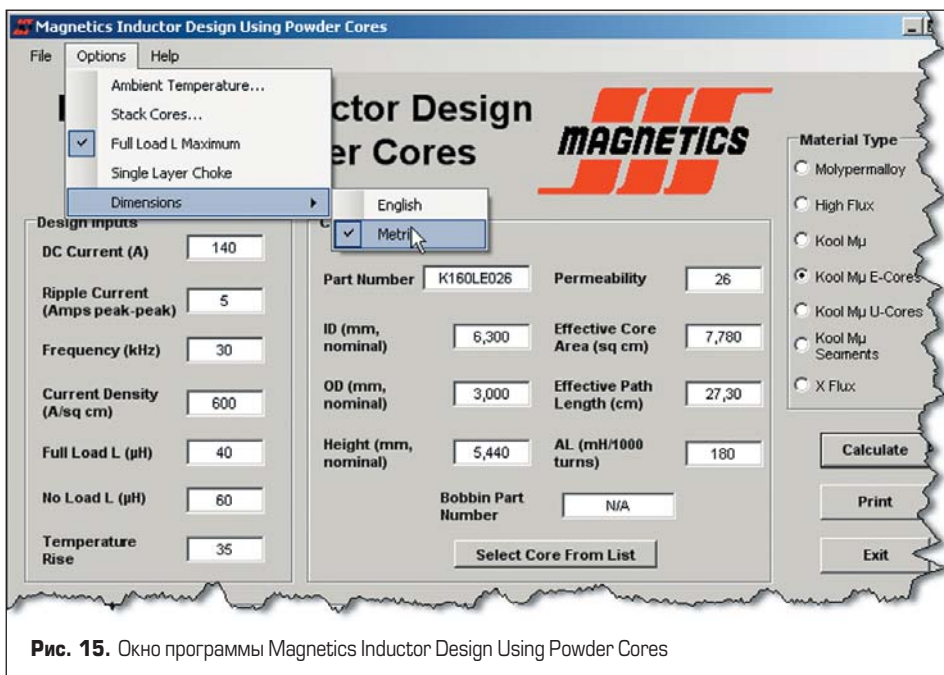


Рис. 15. Окно программы Magnetics Inductor Design Using Powder Cores

Таблица 5. Исходные данные для расчета дросселя

Наименование параметра	Значение
Минимальный ток, А	5
Максимальный ток, А	140
Максимальное входное напряжение, В	100
Напряжение дуги для максимального тока, В	25,6
Индуктивность при минимальном токе, мкГн	60

Таблица 6. Результаты расчета дросселя фильтра

Наименование параметра	Значение
Part Number (номер сердечника)	K8020E040
Permeability (проницаемость)	40
AI (показатель индуктивности), мГн/1000 витков	145
Core Area (сечение сердечника), см ²	3,89
Path Length (длина линии), см	18,5
Turns (витки)	20
Wire Size (размер провода), AWG	6x#12AWG
DC Resistance (сопротивление постоянному току), Ом	0,003
Inductance at Full Load (индуктивность при полной нагрузке), мкГн	36,71
Inductance at No Load (индуктивность без нагрузки), мкГн	58
Core Losses (потери в сердечнике), Вт	1,3
Copper Loss (потери в проводе), Вт	55,1
Total Losses (общие потери), Вт	56,4
Temp Rise (повышение температуры), °C	68,7

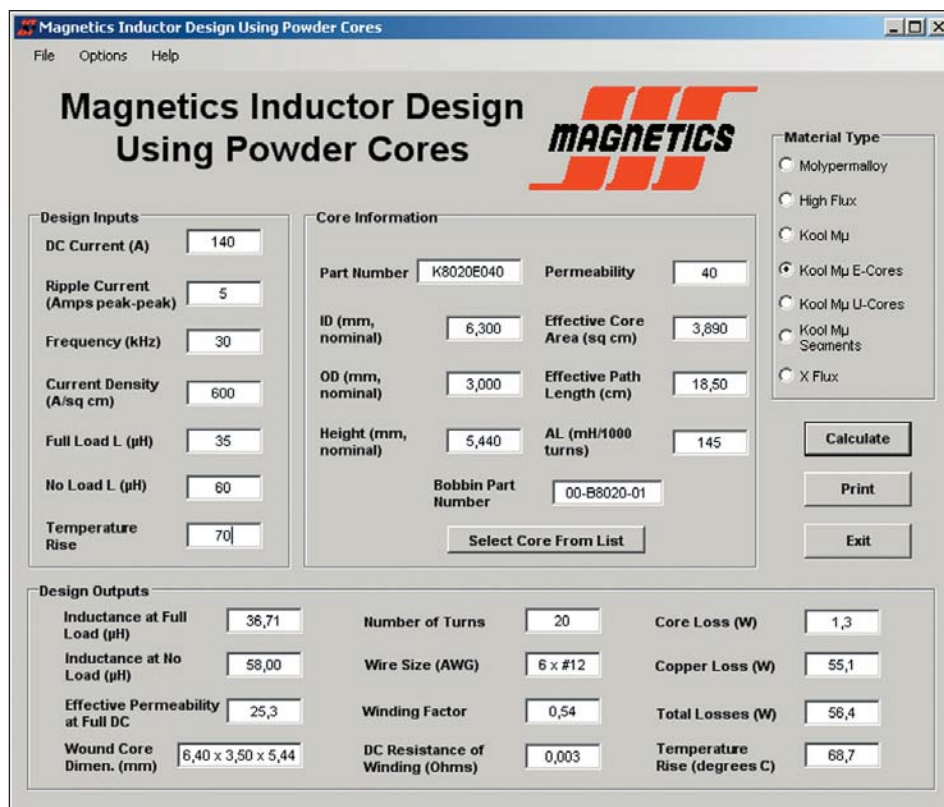


Рис. 16. Окно с результатами расчета дросселя

полнены, щелчком по кнопке **Calculate**. Если программе не удастся рассчитать дроссель с использованием предложенного сердечника, то следует попробовать другие варианты. В нашем случае программе удалось завершить расчет после того, как были выбраны Ш-образные сердечники из альсифера (Kool Mμ E-Cores). Так как расчет ведется из пред-

положения, что используется естественное охлаждение дросселя, то в случае принудительного охлаждения (скорость потока не менее 4 м/с) можно ужесточить тепловой режим дросселя, разрешив повышение температуры на 70 °C (при этом стоит убедиться, что плотность тока в обмотке не превышает 8 А/мм²). Произведем расчет дросселя (рис. 16).

Выбираем минимально возможный сердечник K8020E040 из альсифера. Результаты расчета сведены в таблице 6.

Литература

1. <http://www.micrometals.com>
2. <http://www.mag-inc.com>