

годаря этому стала возможной регулировка тока и напряжения от нуля.

Светодиоды HL1 и HL2 индицируют наличие напряжения минусовой полярности. Светодиод HL3 повышенной яркости сигнализирует о наличии выходного напряжения. По яркости его свечения можно судить о выходном напряжении, если оно станет меньше 1,5 В, светодиод погаснет. RC-цепь R12C7 повышает устойчивость работы микросхемы DA3 при изменении сопротивления нагрузки.

В устройстве применены постоянные резисторы МЛТ или аналогичные импортные с допуском $\pm 5\%$, переменные резисторы — СПЗ-4аМ с функциональной характеристикой А. Резистор R3 изготовлен из нихромовой проволоки диаметром 0,3...0,5 мм. Концы провода запрессованы в штыри от разъёма РПКМ-Ш. Неполярные конденсаторы — К73-17, К10-17, конденсатор С6 танталовый — К52-1, остальные оксидные — К50-35 или импортные. Диоды 1N5822 можно заменить диодами SR306, SR560, диоды D220 можно заменить диодами серий D223, КД521, КД522. Транзисторы П210Б можно заменить транзисторами серий 1Т813, ГТ806. Транзисторы КТ315В можно заменить транзистором серий КТ315, КТ3102 с допустимым напряжением коллектор—эмиттер не менее 30 В. В блоке питания применён трансформатор ТПП268-127/220-50.

Выводы 3 и 7 первичной обмотки соединены между собой, а напряжение 230 В подаётся на выводы 2 и 9. Выводы вторичной обмотки соединяют в следующей последовательности. Выводы 12 и 13 соединены, и переменное напряжение 10 В снимается с выво-

Микросхемы DA2 и DA3 установлены на один плоский теплоотвод общей площадью 60 см² с применением теплопроводящей прокладки и пасты КТП-8 или аналогичной. Каждый из транзисторов VT1, VT3 установлен на ребристый теплоотвод площадью около 900 см².

Обязательно применение теплопроводящей пасты. Вид смонтированной платы показан на рис. 3.

Налаживание проводят в следующей последовательности. Подборкой резистора R5 устанавливают напряжение 1,25...1,3 В на резисторе R4. Затем подборкой резистора R9 устанавливают напряжение 1,25...1,3 В на резисторе R8. При необходимости в нижнем положении движка резистора R8 подборкой резистора R11 устанавливают верхний предел регулировки выходного напряжения.



Рис. 3

дов 11 и 14. Выводы 16 и 17, 18 и 19, 20 и 21 соединены, а переменное напряжение 25 В снимается с выводов 15 и 22.

Большая часть элементов установлена на печатную плату из одностороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 2 мм, её чертёж показан на рис. 2. В отверстия для подключения проводов "Выход" и "Общий" вставлены отрезки лужёного медного провода диаметром 1,2 мм, чтобы при частых перепайках фольга не отслаивалась.

ЛИТЕРАТУРА

1. Voltage Regulator Adjustable Output, Positive 1.5 A LM317, NCV317. — URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm317-d.pdf> (22.12.23).
2. Трансформаторы ТПП. — URL: <https://click.ru/37EGWB> (22.12.23).

От редакции. Чертёж печатной платы находится по адресу <http://ftp.radio.ru/pub/2024/03/stab.zip> на нашем FTP-сервере.

Дроссели для импульсных источников питания на ферритовых Ш-образных магнитопроводах

При повторении импульсных источников питания и стабилизаторов напряжения или самостоятельной их разработке радиолюбители испытывают трудности в подборе магнитопроводов и расчёте индуктивных элементов устройств. Публикуемая статья должна помочь в решении таких задач.

С. БИРЮКОВ, г. Москва

В одноконтурных импульсных источниках питания и стабилизаторах напряжения важнейшим элементом является дроссель или импульсный трансформатор, в котором происходит накопление энергии. Методика их расчёта при использовании ферритовых колец с зазором подробно описана в [1]. Многолетний опыт использования этой методики подтвердил её примени-

мость, можно только отметить, что используемый в таблице этой статьи коэффициент заполнения $k_{зап} = 0,3$ слишком мал, обычно можно использовать $k_{зап} = 0,5$, что иногда позволяет использовать кольца меньшего размера.

В статье [1] приведены формулы, позволяющие определить, пригодно ли имеющееся ферритовое кольцо с выполненным в нём зазором для изго-

товления дросселя с заданной индуктивностью L , который выдерживает требуемый ток $I_{МАХ}$ без насыщения материала магнитопровода:

$$L = A_L \times N^2;$$

$$A_L = \mu_0 \times S / \Delta_{эфф};$$

$$I_{МАХ} = B_{МАХ} \times \Delta_{эфф} / (\mu_0 \times N),$$

где A_L — так называемый коэффициент индуктивности; N — число витков; $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-3}$ мкГн/мм — абсолютная

магнитная проницаемость вакуума; S — площадь сечения магнитопровода; $\Delta_{\text{эфф}}$ — эффективный зазор; B_{MAX} — максимальная индукция, при которой не происходит насыщение магнитопровода.

С помощью приведённых выше формул можно найти максимальную энергию E_{MAX} , которую может накопить дроссель:

$$E_{\text{MAX}} = I_{\text{MAX}}^2 \times L/2 = B_{\text{MAX}}^2 \times \Delta_{\text{эфф}} \times S/(2\mu_0).$$

Из этой формулы следует, что максимальная энергия, накапливаемая в дросселе, при принятых в [1] допущениях (прежде всего, при большой магнитной проницаемости магнитопровода) практически определяется только двумя свойствами используемого магнитопровода — максимально допустимой индукцией его материала и эффективным объёмом зазора.

Это также означает, что энергия в дросселе на ферритовом кольце с зазором накапливается не в материале магнитопровода, а, в основном, в его зазоре, как это, на первый взгляд, ни парадоксально. Для ферритов и других магнитодиэлектриков с малой магнитной проницаемостью зазор распределён между крупинками ферромагнитного материала, и для них это утверждение неприменимо.

Определим максимальную энергию E_{MAX} , которую может накопить дроссель на Ш-образном магнитопроводе, считая, что энергия накапливается только в его зазорах.

Энергия $E_{\text{СР}}$, накапливаемая в среднем зазоре Ш-образного магнитопровода, рассчитывается так же, как и для зазора в кольцевом:

$$E_{\text{СР}} = B_{\text{MAX}}^2 \times \Delta_{\text{эфф}} \times S_{\text{СР}}/(2\mu_0),$$

где $S_{\text{СР}}$ — площадь сечения среднего керна; $\Delta_{\text{эфф}}$ — эффективный зазор среднего керна.

Энергия, которая будет накапливаться в каждом из боковых зазоров магнитопровода, рассчитывается по похожей формуле, но в эту формулу должно подставляться меньшее значение индукции $B_{\text{БОК}}$, поскольку магнитный поток распределяется по двум стержням с большим суммарным сечением:

$$B_{\text{БОК}} = B_{\text{MAX}} \times S_{\text{СР}}/(2S_{\text{БОК}}),$$

где $B_{\text{БОК}}$ — доля магнитного потока в одном боковом зазоре; $S_{\text{СР}}$ — площадь зазора среднего керна; $S_{\text{БОК}}$ — площадь зазора одного бокового керна.

Поэтому энергия в одном боковом зазоре равна:

$$E_{\text{БОК}} = B_{\text{БОК}}^2 \times \Delta_{\text{эфф}} \times S_{\text{БОК}}/(2\mu_0) = B_{\text{MAX}}^2 \times \Delta_{\text{эфф}} \times S_{\text{СР}}^2/(8\mu_0 \times S_{\text{БОК}}).$$

Суммарная энергия, накапливаемая во всех трёх зазорах, равна:

$$E_{\text{СУММ}} = B_{\text{MAX}}^2 \times S_{\text{СР}} \times [\Delta_{\text{эффСР}} + \Delta_{\text{эффБОК}} \times S_{\text{СР}}/(2S_{\text{БОК}})]/(2\mu_0).$$

В последней формуле появились два новых обозначения:

$\Delta_{\text{эффСР}}$ — эффективный зазор среднего керна; $\Delta_{\text{эффБОК}}$ — эффективный зазор бокового керна.

Дело в том, что, как показано в [1], эффективный зазор существенно зависит от отношения геометрического зазора (он одинаков для среднего и боковых кернов) к периметру зазора, а он различается у среднего и боковых кернов.

На рис. 1 приведён график отношения эффективного зазора к геометрическому, обозначенного буквой α , от отношения зазора к периметру, обозначенного буквой β , это рис. 2 из [1]. Из этого графика следует, что эффективная ширина зазора может существенно отличаться от геометрической — в реальном диапазоне изменения β от 0,01 до 0,1 эффективная ширина зазора меньше геометрической в 1,26...2,66 раза.

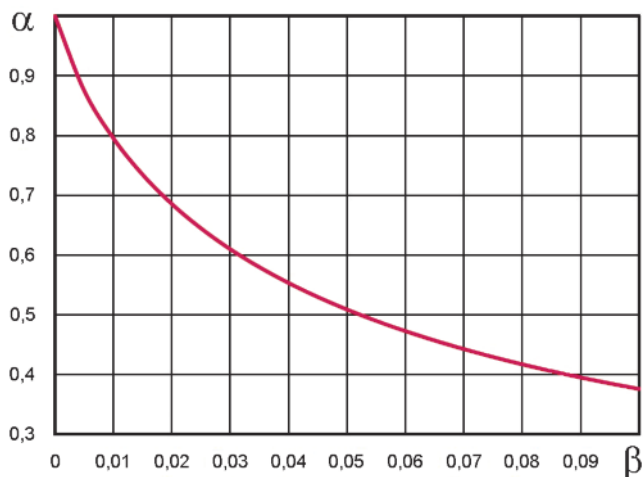


Рис. 1

Для справки приведём формулу, по которой построен этот график (её нет в [1]):

$$\alpha = \frac{1}{1 + 2\beta \left\{ 1 + \ln \left[\frac{8}{\beta} \left(1 + \frac{2}{\pi\beta} \right) \right] + \frac{2}{\pi\beta} \ln \left(1 + \frac{\pi\beta}{2} \right) \right\}}.$$

Соответственно для коэффициента индуктивности дросселя получим следующую формулу:

$$A_L = \mu_0 S_{\text{СР}} / \Delta_{\text{эфф}} = \mu_0 S_{\text{СР}} / [\Delta_{\text{эффСР}} + \Delta_{\text{эффБОК}} S_{\text{СР}} / (2S_{\text{БОК}})].$$

Знаменатель последней формулы можно считать эффективным зазором Ш-образного магнитопровода в целом.

Приведённые выше формулы позволяют проверить, пригоден ли имеющийся ферритовый Ш-образный магнитопровод с вводимым в него зазором для изготовления дросселя с заданной индуктивностью L и выдерживающий требуемый ток I_{MAX} без насыщения материала магнитопровода.

Существует ещё одно важное обстоятельство, влияющее на выбор магнитопровода, — возможность намотки на него требуемого числа витков проводом соответствующего сечения. Необходимая площадь окна магнитопровода равна:

$$S_{\text{ОКНА}} = NS_{\text{ПРОВОД}}/k_{\text{ЗАП}},$$

где $S_{\text{ПРОВОД}}$ — сечение провода; $k_{\text{ЗАП}}$ — коэффициент заполнения окна.

Расчёт $S_{\text{ПРОВОД}}$ производят по формуле

$$S_{\text{ПРОВОД}} = I/j,$$

где j — допустимая плотность тока.

В качестве типового значения для j при расчёте используем 2,5 А/мм².

Подставив в формулу для расчёта площади окна выражения для N и A_L , получим следующую формулу:

$$I_{\text{MAX}}^2 L = (S_{\text{ОКНА}} k_{\text{ЗАП}}) 2 S_{\text{СР}} \mu_0 / \Delta_{\text{эфф}}.$$

В этой формуле в знаменателе — упомянутый выше эффективный зазор Ш-образного магнитопровода в целом.

Однозначного расчёта конструктивных параметров дросселя по заданным индуктивности и току не существует. Однако в подборе Ш-образного магни-

топровода и определения данных обмотки может помочь приведённая ниже табл. 1, расчёты для которой произведены с учётом отличия эффективного зазора от геометрического.

В табл. 1 приведены значения A_L и максимальные значения произведения $I^2 L$ по насыщению и по заполнению, рассчитанные по приведённым выше формулам при $B_{\text{MAX}} = 0,3$ Тл, $j = 2,5$ А/мм² для пяти значений геометрического зазора при использовании магнитопроводов с размерами из табл. 6.9 справочника [2].

Следует отметить, что магнитопроводы выпускаются с минусовым допуском на размеры среднего керна, что, по-видимому, должно гарантировать возможность использования каркаса обмоток с номинальным размером отверстия для среднего керна. Поэтому в расчёте $I^2 L$ использовались минимальные размеры среднего керна Ш-образных магнитопроводов, изготовленных по группе точности I (повышенная точность изготовления), это примерно средние значения размеров керна магнитопроводов, изготовленных по группе точности II (пониженная точность). Такое уточнение размеров заметно улучшило точность расчётов A_L и $I^2 L$ по насыщению.

Для расчёта $I^2 L$ по заполнению использовались размеры окон магнитопроводов, уменьшенные по сравнению с геометрическими из-за необходимости использования каркасов для намотки. Стенки шпильки каркаса считались толщиной от 0,5 до 2 мм для магнитопроводов от Ш2,5×2,5 до Ш20×28 в расчёте на зазор между шпилькой и средним керном, толщину материала и толщину межслойной и межобмоточной

Типоразмер магнитопровода	A_L , мкГн, при геометрическом зазоре, мм					I^2L , A^2 мкГн, при геометрическом зазоре, мм									
	0,2	0,3	0,5	1	1,5	0,2		0,3		0,5		1,0		1,5	
						нас.	зап.	нас.	зап.	нас.	зап.	нас.	зап.	нас.	зап.
Ш2,5×2,5	0,031	0,024	0,017	0,012	0,01	88	4,5	116	2,2	160	1,6	235	1,1	286	0,9
Ш3×3	0,043	0,032	0,023	0,015	0,013	139	11,0	186	8,2	260	5,9	386	3,9	474	3,2
Ш4×4	0,072	0,053	0,037	0,024	0,02	259	57	353	42	504	29	770	19	958	15
Ш5×5	0,11	0,08	0,055	0,035	0,028	435	167	599	121	870	84	1359	53	1712	42
Ш6×6	0,15	0,108	0,074	0,046	0,036	655	615	910	443	1338	301	2127	189	2703	149
Ш7×7	0,209	0,149	0,1	0,062	0,048	844	1882	1183	1343	1759	903	2848	558	3656	434
Ш8×8	0,231	0,164	0,11	0,068	0,052	1264	5165	1777	3676	2654	2461	4323	1511	5570	1172
Ш10×10	0,341	0,241	0,159	0,096	0,073	2194	11299	3109	7975	4703	5273	7813	3174	10187	2434
Ш12×15	0,6	0,419	0,274	0,161	0,122	4060	26440	5802	18499	8898	12062	15125	7097	20008	5365
Ш16×20	1,047	0,726	0,466	0,268	0,199	7514	122475	10839	84908	16870	54555	29407	31296	39555	23267
Ш20×28	1,845	1,27	0,806	0,453	0,332	13109	357196	19044	245875	29991	156132	53400	87687	72895	64237

изоляция. Толщина щёчек каркасов считалась от 2×0,5 до 2×2 мм.

При аккуратной намотке витков к витку теоретически коэффициент заполнения такого каркаса может быть равен $\pi/4 = 0,785$, при расчёте I^2L по заполнению использовалось значение 0,5.

Следует также помнить, что если изготавливается не однообмоточный дроссель, а трансформатор, для второй обмотки следует оставить в окне почти столько же места, сколько занимает первичная, т. е. площадь, доступная для намотки, должна быть в два раза больше, чем для дросселя, а подбираемый магнитопровод должен иметь I^2L по заполнению в четыре раза больше.

Подбор магнитопровода и расчёт конструктивных параметров дросселя продемонстрируем на примере.

Пусть необходим дроссель индуктивностью 2500 мкГн на рабочий ток 0,7 А. Для него значение $I^2L = 1225$, по таблице подбираем магнитопровод Ш7×7. При зазоре 0,5 мм имеем возможность намотать дроссель с запасом по $I^2L_{\text{нас}}$ в 44 % (колонка "нас." — 1759) и с небольшой недостачей по $I^2L_{\text{зап}}$ (колонка "зап." — 903). Интерполируя в сторону уменьшения зазора до 0,4 мм, можно ожидать, что получится некоторый запас, как по $I^2L_{\text{нас}}$, так и по $I^2L_{\text{зап}}$.

Определим параметры дросселя при табличном зазоре 0,5 мм. Для него коэффициент индуктивности по таблице равен $A_L = 0,1$, необходимое число витков $N = \sqrt{L/A_L} = \sqrt{2500/0,1} = 158$.

Допустимый ток $I_{\text{MAX}} = I^2L_{\text{нас}}/L = 1759/2500 = 0,84$ А. Для $I = 0,7$ А при $j = 2,5$ А/мм² необходим провод сечением $S_{\text{пров}} = I/j = 0,7/2,5 = 0,28$ мм², диаметр провода по меди — 0,6 мм, использовался провод ПЭВ-2.

На каркас магнитопровода было намотано 160 витков такого провода. Для проверки измерялись индуктив-

ность дросселя и максимальный ток при различных зазорах. Зазоры в дросселе 0,2 и 0,3 мм обеспечивались прокладками между боковыми кернами из бумаги для принтеров из расчёта её толщины 0,1 мм, а зазоры от 0,5 до 1,5

мм — прокладками из обрезков гетинакса толщиной 0,5 мм.

Индуктивность изготовленного дросселя при различных геометрических зазорах $\Delta_{\text{ГЕОМ}}$ измерялась прибором, описанном в статье [3], а для про-

Таблица 2

$\Delta_{\text{ГЕОМ}}$, мм	$L_{\text{ЭКС}}$, мкГ	$L_{\text{РАСЧ}}$, мкГ	Откл., %	$I_{\text{МАХЭКС}}$, А	$I_{\text{МАХРАСЧ}}$, А	Запас по току
0,2	4750	5350	-11,2	0,7	0,4	1,75
0,3	3600	3814	-5,6	0,9	0,56	1,61
0,5	2480	2560	-3,1	1,3	0,83	1,57
1	1590	1587	0,2	1,8	1,34	1,34
1,5	1300	1228	5,9	2,7	2,3	1,17

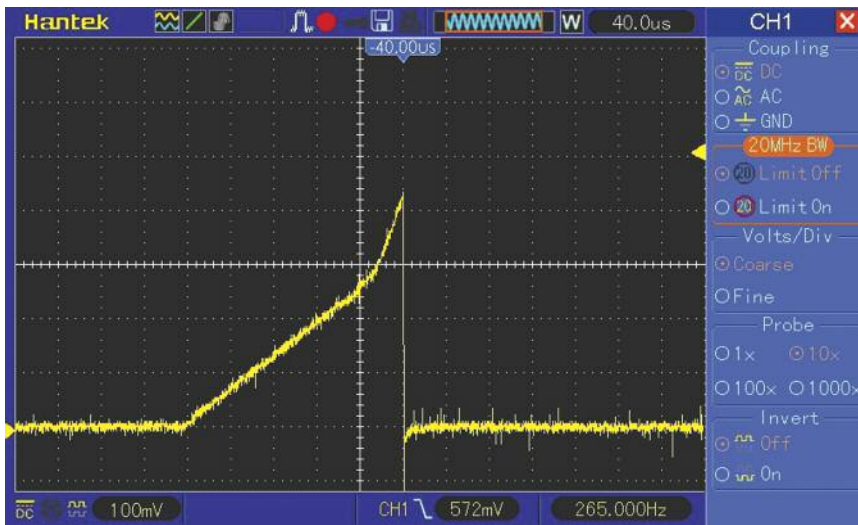


Рис. 2

верки тока насыщения использовалась приставка к осциллографу, схема которой приведена на рис. 3 в [1].

В табл. 2 приведены результаты проверки.

Сравнивая результаты экспериментальных измерений с расчётными, можно сделать следующий вывод.

Реальная индуктивность при малых зазорах (0,2...0,3 мм) получается несколько меньше расчётной. Это может быть следствием того, что при таких зазорах сказывается конечность собственной магнитной проницаемости материала магнитопровода, неточность стыковки половин, неровность торцов кернов, и эффективный зазор получается больше используемого при расчёте. Эту неточность можно компенсировать намоткой катушки с некоторым запасом по числу витков с последующей отмоткой лишних.

Допустимый ток по результатам эксперимента получается с существенным запасом, что весьма полезно. То, что указано в табл. 2 как $I_{\text{МАХЭКС}}$ — это предельное значение тока, граница насыщения конкретного использованного в

эксперименте ферритового магнитопровода, ток, при котором происходит излом зависимости тока от времени при приложении к дросселю постоянного напряжения.

На рис. 2 приведена осциллограмма зависимости тока через изготовленный дроссель с зазором 1,5 мм при приложении к нему импульса напряжением 20 В. Сопротивление токоизмерительного резистора (R_7 на рис. 3 в [1]) равно 0,1 Ом, излом кривой происходит при токе 2,7 А. По скорости нарастания тока на линейном участке можно определить индуктивность дросселя — за 160 мкс ток увеличился до 2,5 А:

$$L = U \times T/I = 20 \times 160 \times 10^{-6} / 2,5 = 1280 \text{ мкГн},$$

что вполне согласуется с результатами измерения индуктивности с помощью прибора [3].

Для уменьшения потерь полезно иметь хороший запас по току, особенно, если используемый ферритовый магнитопровод имеет плавный вход в состояние насыщения (см., например, рис. 2 в статье [4]).

Проведённая проверка изготовленного дросселя подтвердила точность расчёта необходимого числа витков лучше $\pm 10\%$, а также обеспечение хорошего запаса по току насыщения, что можно считать неплохим результатом, учитывая ошибки установки ширины зазора и множество допущений при выводе формул.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков С. Дроссели для импульсных источников питания на ферритовых кольцах. — Схемотехника, 2002, № 6, с. 4—7.
2. Сидоров И. Н., Христинин А. А., Скорняков С. В. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники. Справочник. — М.: Радио и связь, 1989, 384 с.
3. Бирюков С. Цифровой измеритель RCL. — Радио, 1996, № 3, с. 38—41; № 7, с. 62; 1997, № 7, с. 32; 1998, № 5, с. 63; 2001, № 5, с. 44.
4. Бирюков С. Расчёт маломощных обратных преобразователей напряжения на микросхемах. — Радио, 2017, № 4, с. 30—34.