

# Дроссели для импульсных источников питания на ферритовых кольцах

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

В однотактных импульсных источниках питания и стабилизаторах напряжения важнейшим элементом является дроссель или импульсный трансформатор, в котором происходит накопление энергии. Обычно их наматывают на броневого или Ш-образных ферритовых магнитопроводах с зазором или кольцах из Мопермалля МП140 или МП160 [1 — 4]. Магнитопроводы из пресованного пермалля (Мо-пермалля) достаточно дороги и дефицитны. В то же время в большинстве случаев индуктивные элементы таких устройств можно выполнить на широко распространенных кольцах из феррита с проницаемостью 600. .6000, если в них ввести зазор.

Индуктивность  $L$  катушки, намотанной на кольцевом магнитопроводе, как известно, можно найти по формуле [1]

$$L = A_L N^2,$$

где  $A_L$  — так называемый коэффициент индуктивности,  $N$  — число витков катушки. Коэффициент  $A_L$  соответствует индуктивности катушки в один виток и обычно приводится в справочных данных конкретных магнитопроводов [1 — 4], а для кольцевых магнитопроводов может быть легко рассчитан:

$$A_L = \frac{\mu_0 \mu_{\text{эфф}} S_{\text{эфф}}}{l_{\text{эфф}}}$$

где  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-3}$  мкГн/мм — абсолютная магнитная проницаемость вакуума,  $\mu_{\text{эфф}}$  — эффективная начальная магнитная проницаемость материала магнитопровода,  $S_{\text{эфф}}$  — эффективная площадь сечения магнитопровода в мм<sup>2</sup>,  $l_{\text{эфф}}$  — эффективная длина магнитопровода в мм.

Зная величину  $A_L$ , нетрудно определить число витков катушки для получения необходимой индуктивности:

$$N = \sqrt{L/A_L}$$

Эффективное сечение и длина магнитопровода несколько меньше определяемых по его геометрическим параметрам и обычно приводятся в справочной литературе. В Табл. 1 в первых пяти столбцах приведены геометрические размеры, эффективные сечение и длина  $l_{\text{эфф}}$  для ферритовых колец стандартного ряда с внешним диаметром  $D$  от 6 до 50 мм, внутренним  $d$  и высотой  $h$  [1].

В этой же таблице приведены расчетные значения площади окна магнитопроводов  $S_{\text{окн}}$ , периметра сечения  $p$  и коэффициента индуктивности  $A_L$  для  $\mu_{\text{эфф}} = 50$ . Данные позволяют рассчитать индуктивность любой катушки, намотанной на кольцевом магнитопроводе с табличными геометрическими размерами. Если  $\mu_{\text{эфф}}$  используемого кольца отличается от 50, значение  $A_L$  необходимо пропорционально изменить,

например, для  $\mu_{\text{эфф}} = 2000$  коэффициент  $A_L$  следует увеличить в 40 раз. Следует иметь в виду, что значения  $\mu_{\text{эфф}}$ ,  $S_{\text{эфф}}$  и  $l_{\text{эфф}}$  определяются с большой погрешностью, и в справочниках для кольцевых магнитопроводов указан обычно двукратный разброс значений  $A_L$  [1]. Поэтому величины  $A_L$ , взятые из **Таблицы 1**, следует принимать как ориентировочные и уточнять их при необходимости более точного расчета по результатам эксперимента.

Для этого следует намотать на магнитопроводе пробную катушку, например, из десяти витков и измерить ее индуктивность  $L_{\text{пр}}$ . Здесь себя хорошо зарекомендовал прибор, описанный в [5]. Разделив  $L_{\text{пр}}$  на  $100 = 10^2$ , определим значение  $A_L$ . Расчетное значение  $N$  следует увеличить на несколько витков (до  $N_1$ ), по результату измерения  $L_1$  уточнить необходимое число витков  $N = N_1 \sqrt{L/L_1}$  и отмотать лишние витки.

Описанным выше образом можно рассчитать индуктивность катушки или необходимое число витков. Однако, как только речь заходит о дросселях для импульсных источников питания, сразу возникает вопрос, какой ток может выдержать дроссель без насыщения магнитопровода?

Магнитная индукция  $B$  в магнитопроводе при токе  $I$  может быть рассчитана по формуле

$$B = \frac{\mu_0 \mu_{\text{эфф}} IN}{l_{\text{эфф}}}$$

Максимально допустимая индукция  $B_{\text{max}}$  для материалов магнитопроводов приводится в справочных данных и лежит в пределах 0, 25...0,5 Тл. Из этой формулы несложно получить выражение для максимального тока дросселя:

$$I_{\text{max}} = \frac{B_{\text{max}} l_{\text{эфф}}}{\mu_0 \mu_{\text{эфф}} N}$$

Если в нее подставить формулу для определения числа витков по заданной индуктивности, получим

$$I_{\text{max}} = \sqrt{V_{\text{эфф}} / (\mu_0 \mu_{\text{эфф}} L)}$$

где  $V_{\text{эфф}} = S_{\text{эфф}} l_{\text{эфф}}$  — эффективный объем магнитопровода. Нетрудно видеть, что чем выше  $\mu_{\text{эфф}}$ , тем меньший ток может пропустить дроссель при тех же геометрических размерах магнитопровода и заданной индуктивности. Более или менее приемлемые результаты при изготовлении дросселей для ИВЭП получаются при  $\mu_{\text{эфф}} = 30... 50$ . Именно поэтому в **Таблице 1** значение коэффициента  $A_L$  приведено для

$\mu_{эфф} = 50$ . В той же таблице приведено максимальное значение тока  $I_{max}$  через дроссель с одним витком при  $B_{max} = 0,3$  Тл. Для определения допустимого тока реального дросселя достаточно табличное значение  $I_{max}$  разделить на число витков  $N$ .

Однако в радиолюбительской практике более доступны кольцевые магнитопроводы с большими значениями эффективной магнитной проницаемости  $\mu_{эфф} = 600...6000$ . Понизить эффективную магнитную проницаемость таких магнитопроводов можно введением зазора, при этом

$$\mu_{эфф} = \frac{\mu_{нач}}{1 + \mu_{нач} \frac{\Delta_{эфф}}{l_{эфф}}}$$

где  $\mu_{нач}$  — начальная магнитная проницаемость материала магнитопровода,  $\Delta_{эфф}$  — эффективная ширина зазора. При реальной ширине зазора  $\mu_{эфф} = l_{эфф} / \Delta_{эфф}$ . Для того, чтобы снизить  $\mu_{эфф}$  примерно до 50...100 (это значение исходя из опыта расчета и изготовления дросселей близко к оптимальному), эффективная ширина зазора должна составлять  $\Delta_{эфф} = l_{эфф} / (50...100)$  независимо от начальной магнитной проницаемости магнитопровода.

Если в вышеприведенную формулу для расчета  $A_L$  подставить значение  $\mu_{эфф}$  для магнитопровода с зазором, получим

$$A_L = \frac{\mu_0 S_{эфф}}{\Delta_{эфф}}$$

Еще более простой получается формула для максимального тока через дроссель

$$I_{max} = \frac{B_{max} \Delta_{эфф}}{\mu_0 N} \cong \frac{240 \cdot \Delta_{эфф}}{N} \quad (\text{для } B_{max} = 0,3 \text{ Тл})$$

т. е. допустимый ток определяется только эффективным зазором и числом витков.

Почти все приведенные выше формулы уже были опубликованы в журнале «Схемотехника» [4], однако ни в одной из известных автору статьи публикаций не отмечено, что эффективная ширина зазора, которую

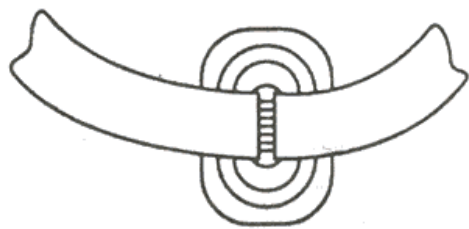


Рис. 1

надо применять в расчетах, меньше геометрической. Это различие возникает из-за того, что магнитное поле, существующее рядом с зазором (Рис. 1), шунтирует зазор и уменьшает его эффективную ширину. Для того, чтобы рассчитать влияние этого поля, можно обратиться к аналогии между магнитным и электрическим полями. Воспользуемся формулой для емкости конденсатора из двух цилиндров с близко расположенными торцами [6]:

$$C = \frac{D^2}{16d} + \frac{D}{8\pi} \cdot \left\{ 1 + \ln \frac{8\pi D(+b)}{d^2} + \frac{b}{d} \cdot \ln \left( 1 + \frac{d}{b} \right) \right\}$$

где  $C$  — емкость конденсатора в сантиметрах,  $D$  — диаметр цилиндров,  $b$  — их высота,  $d$  — зазор между их торцами.

Нетрудно заметить, что первое слагаемое соответствует емкости зазора между цилиндрами, а второе — емкости, вносимой боковыми поверхностями цилиндров. Будем считать, что высота цилиндров равна их удвоенному диаметру  $b = 2D$ . Это означает, что мы учтем только емкость ближайшей к зазору части боковой поверхности цилиндров, пренебрегая дальней. Расчеты при длине цилиндров в 3 или 4 диаметра дают практически тот же результат.

Для того, чтобы в дальнейшем перейти от емкости между цилиндрами к емкости между прямоугольными брусками (а это по форме ближе к сечению ферритового кольца), будем считать, что емкость, вносимая боковыми поверхностями, пропорциональна периметру зазора, и выразим в этой формуле диаметр цилиндров через периметр  $p$  их кругового сечения:

$$D = p / \pi$$

высота цилиндров  $b = 2D = 2p / \pi$ .

Если в формулу для емкости подставить эти выражения, можно определить из нее отношение полной емкости к емкости между торцами в функции от отношения зазора к периметру цилиндров  $\beta = d/b$ . Формула эта, однако, получается довольно громоздкой и неудобной для применения.

Обозначим буквой  $\alpha$  отношение эффективного зазора, обеспечивающего без емкости боковых поверхностей ту же емкость, что и емкость между торцами с учетом емкости боковых поверхностей, к геометрическому. На Рис. 2 приведена расчетная зависимость  $\alpha$  от  $\beta$ . Из подобия уравнений, описывающих электрическое и магнитное поле, следует, что аналогично выглядит и зависимость отношения эффективного магнитного зазора к геометрическому от отношения геометрического магнитного зазора к периметру.

Из графика на Рис. 2 следует, что эффективная ширина зазора может существенно отличаться от геометрической. В реальном диапазоне  $\beta$  составляет от 0,01 до 0,1 эффективная ширина зазора меньше геометрической в 1,26...2,66 раза.

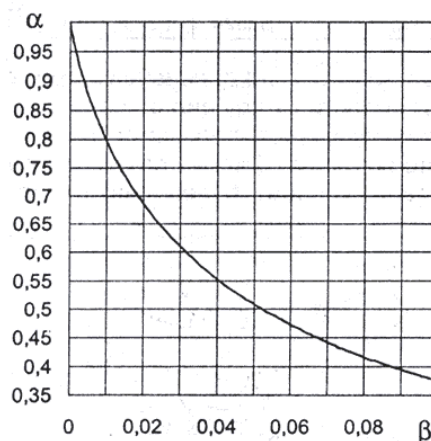


Рис. 2

Таблица 1

| D,<br>мм | d, мм | h, мм | I <sub>эфф</sub> , мм | S <sub>эфф</sub> , мм <sup>2</sup> | S <sub>окн</sub> , мм <sup>2</sup> | P, мм | Без зазора<br>(μ <sub>эфф</sub> =50) |                             | A <sub>L</sub> , мкГн с зазором, мм |      |       |       | I <sup>2</sup> L, A <sup>2</sup> мкГн с зазором, мм |        |      |       |      |        |       |        |
|----------|-------|-------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------|-------|-------|-----------------------------------------------------|--------|------|-------|------|--------|-------|--------|
|          |       |       |                       |                                    |                                    |       | A <sub>L</sub> , мкГн                | I <sub>макс</sub> , A (N=1) | 0,25                                | 0,5  | 1     | 1,5   | 0,25                                                |        | 0,5  |       | 1    |        | 1,5   |        |
|          |       |       |                       |                                    |                                    |       |                                      |                             |                                     |      |       |       | нас.                                                | зап.   | нас. | зап.  | нас. | зап.   | нас.  | зап.   |
| 6        | 2,5   | 1,8   | 11,8                  | 2,96                               | 4,9                                | 7,1   | 0,016                                | 56,28                       | 0,03                                | 0,02 | 0,012 | 0,01  | 30,65                                               | 0,3487 | 46,8 | 0,229 | 67,2 | 0,1591 | 81,3  | 0,1314 |
| 6        | 3     | 2,4   | 13,1                  | 3,53                               | 7,1                                | 7,8   | 0,017                                | 62,34                       | 0,03                                | 0,02 | 0,013 | 0,011 | 37,72                                               | 0,8357 | 58,1 | 0,543 | 84   | 0,3751 | 102   | 0,3089 |
| 7        | 4     | 1,5   | 16,4                  | 2,19                               | 13                                 | 6     | 0,008                                | 78,33                       | 0,02                                | 0,01 | 0,009 | 0,008 | 21,37                                               | 1,7945 | 32,1 | 1,195 | 45,5 | 0,8421 | 54,85 | 0,6989 |
| 7        | 4     | 2     | 16,4                  | 2,92                               | 13                                 | 7     | 0,011                                | 78,33                       | 0,03                                | 0,02 | 0,012 | 0,01  | 30,09                                               | 2,2654 | 45,8 | 1,487 | 65,8 | 1,0362 | 79,58 | 0,8564 |
| 7,5      | 3     | 2,2   | 14,4                  | 4,62                               | 7,1                                | 8,9   | 0,02                                 | 68,69                       | 0,04                                | 0,02 | 0,016 | 0,013 | 51,48                                               | 1,0488 | 80,3 | 0,672 | 117  | 0,4597 | 143,2 | 0,3769 |
| 8        | 4     | 2,5   | 17,4                  | 4,9                                | 13                                 | 9     | 0,018                                | 83,1                        | 0,04                                | 0,03 | 0,017 | 0,014 | 54,79                                               | 3,5035 | 85,6 | 2,243 | 125  | 15324  | 152,8 | 1,2561 |
| 9        | 6     | 3     | 22,9                  | 4,44                               | 28                                 | 9     | 0,012                                | 109,5                       | 0,04                                | 0,02 | 0,016 | 0,013 | 49,64                                               | 16,071 | 77,5 | 10,29 | 113  | 7,0299 | 138,4 | 5,7624 |
| 10       | 4     | 3     | 19,2                  | 8,4                                | 13                                 | 12    | 0,028                                | 91,6                        | 0,06                                | 0,04 | 0,026 | 0,021 | 102                                                 | 5,5315 | 164  | 3,441 | 246  | 2,2916 | 303,7 | 1,8568 |
| 10       | 6     | 2     | 24,1                  | 3,91                               | 28                                 | 8     | 0,01                                 | 114,9                       | 0,03                                | 0,02 | 0,015 | 0,012 | 42,12                                               | 14,688 | 65   | 9,515 | 94,3 | 6,5635 | 114,5 | 5,4021 |
| 10       | 6     | 3     | 24,1                  | 5,87                               | 28                                 | 10    | 0,015                                | 114,9                       | 0,05                                | 0,03 | 0,02  | 0,016 | 67,73                                               | 20,588 | 107  | 13,04 | 158  | 8,8311 | 193,4 | 7,21   |
| 10       | 6     | 4,5   | 24,1                  | 8,81                               | 28                                 | 13    | 0,023                                | 114,9                       | 0,06                                | 0,04 | 0,026 | 0,021 | 109,2                                               | 28,765 | 177  | 17,75 | 268  | 11,734 | 331,5 | 9,4738 |
| 10       | 6     | 5     | 24,1                  | 9,63                               | 28                                 | 14    | 0,025                                | 114,9                       | 0,07                                | 0,04 | 0,028 | 0,022 | 121,6                                               | 30,866 | 198  | 18,91 | ^302 | 12,41  | 375,8 | 9,9858 |
| 12       | 5     | 5,5   | 23,6                  | 18,1                               | 20                                 | 18    | 0,048                                | 112,5                       | 0,12                                | 0,07 | 0,047 | 0,037 | 241,6                                               | 26,376 | 404  | 15,77 | 631  | 10,098 | 794,2 | 8,0238 |
| 12       | 6     | 4,5   | 26,1                  | 13                                 | 28                                 | 15    | 0,031                                | 124,7                       | 0,09                                | 0,06 | 0,036 | 0,029 | 166,5                                               | 40,889 | 274  | 24,88 | L420 | 16,221 | 523,3 | 13,008 |
| 12       | 8     | 3     | 30,6                  | 5,92                               | 50                                 | 10    | 0,012                                | 145,9                       | 0,05                                | 0,03 | 0,02j | 0,016 | 68,31                                               | 65,624 | 108  | 41,58 | 159  | 28,148 | 195   | 22,981 |
| 12       | 9     | 4     | 29,7                  | 4,97                               | 64                                 | 11    | 0,011                                | 141,6                       | 0,04                                | 0,02 | 0,016 | 0,013 | 58,93                                               | 85,886 | 93,9 | 53,9  | 140  | 36,18  | 171,9 | 29,425 |
| 13       | 5,5   | 5     | 25,7                  | 17,6                               | 24                                 | 18    | 0,043                                | J22,7                       | 0,12                                | 0,07 | 0,046 | 0,036 | 233,5                                               | 37,775 | 389  | 22,65 | 607  | 14,542 | 762,3 | 11,571 |
| 15       | 6     | 4,5   | 28,8                  | 18,9                               | 28                                 | 18    | 0,041                                | 137,4                       | 0,13                                | 0,08 | 0,049 | 0,039 | 252,6                                               | 57,175 | 422  | 34,19 | 660  | 21,89  | 830,2 | 17,393 |
| 16       | 4     | 2,5   | 23,2                  | 12,8                               | 13                                 | 17    | 0,035                                | 110,9                       | 0,09                                | 0,05 | 0,034 | 0,027 | 169,2                                               | 7,7536 | 281  | 4,662 | 437  | 3,0017 | 548,3 | 2,3921 |
| 16       | 8     | 6     | 34,9                  | 23,1                               | 50                                 | 20    | 0,042                                | 166,4                       | 0,15                                | 0,09 | 0,057 | 0,045 | 315,1                                               | 215,87 | 532  | 127,8 | 840  | 80,981 | 1063  | 63,984 |
| 16       | 10    | 4,5   | 39,4                  | 13,3                               | 79                                 | 15    | 0,021                                | 187,9                       | 0,09                                | 0,06 | 0,037 | 0,03  | 170,1                                               | 322,31 | 280  | 196,1 | 429  | 127,86 | 534,6 | 102,54 |
| 17       | 5,5   | 2,3   | 28,8                  | 11,9                               | 24                                 | 16    | 0,026                                | 137,6                       | 0,08                                | 0,05 | 0,032 | 0,026 | 155,4                                               | 26,082 | 257  | 15,76 | 397  | 10,205 | 497   | 8,1551 |
| 18       | 8,2   | 5     | 36,8                  | 22,2                               | 53                                 | 19    | 0,038                                | 175,4                       | 0,15                                | 0,09 | 0,056 | 0,044 | 300,8                                               | 230,73 | 506  | 137,1 | 796  | 87,153 | 1005  | 68,993 |
| 18       | 9     | 5     | 39,2                  | 21,6                               | 64                                 | 19    | 0,035                                | 187,1                       | 0,14                                | 0,09 | 0,055 | 0,043 | 292,4                                               | 327,57 | 491  | 194,9 | 772  | 124,1  | 973,9 | 98,328 |
| 18       | 14    | 12    | 49,7                  | 23,9                               | 154                                | 28    | 0,03                                 | 237,4                       | 0,15                                | 0,09 | 0,052 | 0,04  | 346,4                                               | 1973,2 | 603  | 1134  | 984  | 694,75 | 1268  | 538,66 |
| 20       | 10    | 5     | 43,6                  | 24                                 | 79                                 | 20    | 0,035                                | 207,9                       | 0,16                                | 0,09 | 0,059 | 0,047 | 328,2                                               | 548,98 | 554  | 325   | 875  | 205,94 | 1107  | 162,71 |
| 20       | 10    | 7,5   | 43,6                  | 36                                 | 79                                 | 25    | 0,052                                | 207,9                       | 0,23                                | 0,13 | 0,082 | 0,064 | 513                                                 | 789,86 | 884  | 458,3 | 1427 | 283,99 | 1828  | 221,62 |
| 20       | 12    | 4     | 48,1                  | 15,4                               | 113                                | 16    | 0,02                                 | 229,8                       | 0,11                                | 0,06 | 0,042 | 0,033 | 200,8                                               | 765,79 | 332  | 463,1 | 513  | 300    | 641,2 | 239,81 |
| 20       | 12    | 6     | 48,1                  | 23,5                               | 113                                | 20    | 0,031                                | 229,8                       | 0,15                                | 0,09 | 0,058 | 0,046 | 320,8                                               | 1112,8 | 542  | 658,8 | 855  | 417,43 | 1082  | 329,82 |
| 20       | 12    | 7,5   | 48,1                  | 28,9                               | 113                                | 23    | 0,038                                | 229,8                       | 0,19                                | 0,11 | 0,068 | 0,053 | 405,4                                               | 1333,2 | 693  | 779,3 | 1110 | 486,94 | 1415  | 381,79 |
| 21       | 11    | 5     | 46,9                  | 24,2                               | 95                                 | 20    | 0,032                                | 224                         | 0,16                                | 0,09 | 0,06  | 0,047 | 330                                                 | 808,11 | 557  | 478,5 | 880  | 303,14 | 1113  | 239,52 |
| 22       | 10    | 6,5   | 45,4                  | 37                                 | 79                                 | 25    | 0,051                                | 216,8                       | 0,23                                | 0,14 | 0,084 | 0,066 | 527,5                                               | 812,22 | 909  | 471,3 | 1467 | 292,03 | 1879  | 227,89 |
| 25       | 12    | 6     | 53,2                  | 37,3                               | 113                                | 25    | 0,044                                | 254                         | 0,24                                | 0,14 | 0,085 | 0,066 | 531,2                                               | 1696,1 | 915  | 984,2 | 1477 | 609,81 | 1893  | 475,88 |
| 25       | 12    | 9     | 53,2                  | 55,9                               | 113                                | 31    | 0,066                                | 254                         | 0,34                                | 0,19 | 0,118 | 0,091 | 824,7                                               | 2457   | 1447 | 1400  | 2386 | 849,32 | 3095  | 654,61 |
| 25       | 15    | 7,5   | 57,8                  | 36,7                               | 177                                | 25    | 0,04                                 | 275,9                       | 0,23                                | 0,13 | 0,083 | 0,065 | 522,6                                               | 4074,1 | 901  | 2364  | 1454 | 1464,8 | 1862  | 1143,1 |
| 28       | 16    | 6     | 65,6                  | 34,1                               | 201                                | 24    | 0,033                                | 313,3                       | 0,22                                | 0,13 | 0,079 | 0,062 | 482,7                                               | 4941,4 | 829  | 2878  | 1332 | 1790,3 | 1703  | 1400,3 |
| 28       | 16    | 9     | 65,6                  | 52,6                               | 201                                | 30    | 0,05                                 | 313,3                       | 0,32                                | 0,18 | 0,112 | 0,087 | 771,8                                               | 7339,4 | 1350 | 4194  | 2220 | 2552   | 2874  | 1970,7 |
| 31       | 18,5  | 7     | 74,4                  | 42,8                               | 269                                | 27    | 0,036                                | 355,2                       | 0,27                                | 0,15 | 0,095 | 0,074 | 615,4                                               | 10883  | 1065 | 6283  | 1730 | 3870,8 | 2224  | 3010,6 |
| 31       | 18,5  | 14    | 74,4*                 | 85,6                               | 269                                | 41    | 0,072                                | 355,2                       | 0,5                                 | 0,28 | 0,166 | 0,126 | 1309                                                | 20475  | 2344 | 11429 | 3965 | 6759,4 | 5226  | 5128,6 |
| 32       | 16    | 8     | 69,7                  | 61,5                               | 201                                | 32    | 0,055                                | 332,6                       | 0,37                                | 0,21 | 0,128 | 0,099 | 911                                                 | 8497   | 1602 | 4830  | 2650 | 2920,6 | 3444  | 2246,9 |
| 32       | 16    | 12    | 69,7                  | 92,3                               | 201                                | 40    | 0,083                                | 332,6                       | 0,54                                | 0,3  | 0,18  | 0,137 | 1409                                                | 12365  | 2520 | 6909  | 4258 | 4090,3 | 5607  | 3105,7 |
| 32       | 20    | 6     | 78,8                  | 35,3                               | 314                                | 24    | 0,028                                | 375,9                       | 0,22                                | 0,13 | 0,082 | 0,064 | 499,7                                               | 12488  | 858  | 7272  | 1379 | 4524,6 | 1763  | 3539   |
| 32       | 20    | 9     | 78,8                  | 53                                 | 314                                | 30    | 0,042                                | 375,9                       | 0,33                                | 0,19 | 0,113 | 0,087 | 777,8                                               | 18058  | 1361 | 10317 | 2237 | 6279   | 2896  | 4848,8 |
| 38       | 24    | 7     | 94                    | 48,2                               | 452                                | 28    | 0,032                                | 448,9                       | 0,3                                 | 0,17 | 0,105 | 0,082 | 698,8                                               | 34376  | 1215 | 19754 | 1985 | 12103  | 2559  | 9384   |
| 40       | 20    | 5     | 87,1                  | 48,1                               | 314                                | 30    | 0,035                                | 415,8                       | 0,29                                | 0,17 | 0,103 | 0,079 | 704,9                                               | 16365  | 1233 | 9351  | 2027 | 5690,4 | 2625  | 4394,3 |
| 40       | 20    | 7,5   | 87,1                  | 72,1                               | 314                                | 35    | 0,052                                | 415,8                       | 0,43                                | 0,24 | 0,146 | 0,112 | 1081                                                | 24002  | 1915 | 13546 | 3195 | 8121,8 | 4175  | 6215,4 |
| 40       | 24    | 12    | 96,3                  | 93,9                               | 452                                | 40    | 0,061                                | 459,6                       | 0,55                                | 0,31 | 0,183 | 0,139 | 1434                                                | 63742  | 2567 | 35616 | 4336 | 21087  | 5710  | 16011  |
| 40       | 25    | 7,5   | 98,4                  | 55,2                               | 491                                | 30    | 0,035                                | 469,9                       | 0,34                                | 0,19 | 0,118 | 0,091 | 810,2                                               | 45925  | 1418 | 26240 | 2330 | 15968  | 3017  | 12331  |
| 40       | 25    | 11    | 98,4                  | 81,1                               | 491                                | 37    | 0,052                                | 469,9                       | 0,48                                | 0,27 | 0,162 | 0,123 | 1226                                                | 65455  | 2181 | 36785 | 3658 | 21938  | 4795  | 16734  |
| 45       | 28    | 8     | 110                   | 66,7                               | 616                                | 33    | 0,038                                | 527,3                       | 0,4                                 | 0,23 | 0,138 | 0,106 | 993                                                 | 86097  | 1751 | 48816 | 2905 | 29434  | 3782  | 22603  |
| 45       | 28    | 12    | 110                   | 97,8                               | 616                                | 41    | 0,056                                | 527,3                       | 0,57                                | 0,32 | 0,189 | 0,144 | 1498                                                | 122602 | 2686 | 68382 | 4548 | 40393  | 5998  | 30626  |
| 50       | 25    | 6     | 109                   | 72,1                               | 491                                | 37    | 0,042                                | 519,7                       | 0,43                                | 0,24 | 0,144 | 0,11  | 1089                                                | 58160  | 1938 | 32685 | 3250 | 19493  | 4261  | 14869  |
| 50       | 25    | 9     | 109                   | 108                                | 491                                | 43    | 0,062                                | 519,7                       | 0,63                                | 0,35 | 0,206 | 0,156 | 1665                                                | 85599  | 2995 | 47581 | 5094 | 27984  | 6737  | 21157  |
| 50       | 30    | 10    | 120                   | 97,9                               | 707                                | 40    | 0,051                                | 574,5                       | 0,58                                | 0,32 | 0,191 | 0,145 | 1494                                                | 162098 | 2673 | 90572 | 4516 | 53624  | 5948  | 40716  |

В Таблице 1 приведены значения  $A_L$  для кольцевых магнитопроводов с четырьмя различными зазорами, рассчитанные с учетом отличия эффективного зазора от геометрического.

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что необходимые число витков и зазор практически не зависят от начальной магнитной проницаемости материала магнитопровода, и поэтому можно применить ферриты с любой проницаемостью, большей 600. Для любого имеющегося кольца с табличным зазором по значению  $A_L$  нетрудно вычислить индуктивность или необходимое число витков и рассчитав  $\beta = \Delta/\rho$ , по графику (рис. 2) определить значение  $\alpha = \Delta_{эфф}/\rho$  и  $\Delta_{эфф} = \alpha\rho$ . По найденному значению  $\Delta_{эфф}$  и при-

веденной ранее формуле можно найти максимальный ток, не вызывающий насыщения сердечника.

Однако существует еще одно обстоятельство, влияющее на выбор магнитопровода — возможность намотки на него требуемого числа витков проводом соответствующего сечения. Необходимая площадь окна кольца составляет

$$S_{окн} = NS_{пров}/k_{зап}$$

где  $S_{пров}$  — сечение провода, а  $k_{зап}$  — коэффициент заполнения окна. Расчет  $S_{пров}$  производят по формуле  $S_{пров} = I/j$ , где  $j$  — допустимая плотность тока. Типовое значение  $k_{зап}$  по меди составляет 0,3, а для  $j$

при начальном расчете принимают значение 2,5 А/мм<sup>2</sup>.

Подставив в формулу для расчета площади окна выражения для N и A<sub>L</sub>, получим следующую формулу:

$$I^2 L = (S_{\text{окн}} j k_{\text{зап}})^2 \mu_0 S_{\text{эфф}} / \Delta_{\text{эфф}}$$

Подобное выражение можно получить и из формулы для максимального тока, который можно пропустить через дроссель без насыщения сердечника:

$$I^2 L = V_{\text{max}}^2 S_{\text{эфф}}^2 / (\mu_0 \mu_{\text{эфф}})$$

Однозначного расчета конструктивных параметров дросселя по заданной индуктивности и току не существует. Однако при подборе кольца и определении данных обмотки могут помочь последние восемь колонок табл. 1. В них приведены максимальные значения произведения I<sup>2</sup>L по насыщению и по заполнению, рассчитанные по приведенным выше формулам для V<sub>max</sub> = 0,3 Тл, k<sub>зап</sub> = 0,3, j = 2,5 А/мм<sup>2</sup> и четырех значений зазора.

Подбор колец и расчет конструктивных параметров дросселей продемонстрируем на двух примерах.

Пусть необходим дроссель индуктивностью 22 мкГн на рабочий ток 1,2 А. Для него значение I<sup>2</sup>L = 1,2<sup>2</sup> × 22 = 31,68. Среди колец минимального диаметра первым почти подходит кольцо К10х6х4, 5. При введении в него зазора 0,25 мм имеем возможность намотать дроссель с большим запасом по току (**Таблица 1**, колонка «нас.»), но с некоторым превышением плотности тока относительно 2,5 А/мм<sup>2</sup> (колонка «зап.»).

Определим параметры дросселя при зазоре 0,25 мм. Для него коэффициент индуктивности по **Таблице 1** составит A<sub>L</sub> = 0,064, необходимое число витков

$$\Delta_{\text{эфф}} = \sqrt{22/0,064} = 18,5$$

(округляем до 19), допустимый ток Для I = 1,2 А при j = 2,5 А/мм<sup>2</sup> необходим провод сечением

$$S_{\text{пров}} = I/j = 1,2/2,5 = 0,48 \text{ мм}^2$$

При коэффициенте заполнения k<sub>зап</sub> = 0,3 необходимая площадь окна составит S<sub>окн</sub> = S<sub>пров</sub> N/k<sub>зап</sub> = 0,48 × 19/0,3 = 30,4 мм<sup>2</sup>. Площадь окна по **Таблице 1** составляет 28,3 мм<sup>2</sup>, что несколько меньше. Необходимо за счет увеличения плотности тока уменьшить сечение провода до

$$S_{\text{пров}} = S_{\text{окн}} k_{\text{зап}} / N = 28,3 \times 0,3 / 19 = 0,446 \text{ мм}^2$$

Плотность тока составит j = I/S<sub>пров</sub> = 1,2/0,446 = 2,68 А/мм<sup>2</sup>, что вполне допустимо. Диаметр провода указанного сечения (по меди) можно рассчитать по формуле:

$$d_{\text{пров}} = 2 \sqrt{S_{\text{пров}} / \pi} = 2 \sqrt{0,446 / 3,14} = 0,75 \text{ мм}$$

Пусть необходим дроссель 88 мкГн на ток 1,25 А. Для него I<sup>2</sup>L = 137,5. Дроссель можно намотать на кольцо К12х6х4,5 с тем же зазором, при этом насыще-

ния магнитопровода происходить не будет, но плотность тока существенно превысит норму. Поэтому необходимо перейти к кольцу большего размера. В распоряжении автора были кольца К12х8х3 из феррита М4000НМ. На одном кольце невозможно намотать необходимый дроссель, ни по насыщению сердечника, ни по заполнению окна. Можно сложить два кольца вместе. В этом случае эффективное сечение магнитопровода увеличивается в два раза, а допустимые значения I<sup>2</sup>L вырастут по насыщению несколько более, а по заполнению несколько менее, чем в два раза. Поэтому необходимый дроссель при геометрическом зазоре 0,25 мм можно намотать с запасом по току насыщения и с небольшим превышением плотности тока.

Только табличными сведениями теперь не обойтись, необходим полный расчет. Для двух колец периметр сечения (при зазоре 0,25 мм):

$$p = D - d + 4 \cdot h = 12 - 8 + 4 \cdot 3 = 16 \text{ мм},$$

$$\beta = \Delta/p = 0,25/16 = 0,0156.$$

По графику на **Рис. 2** находим α = 0,73, откуда эффективный зазор

Δ<sub>эфф</sub> = Δ · α = 0,25 · 0,73 = 0,183 мм. Найденное значение

$$A_L = \mu_0 S_{\text{эфф}} / \Delta_{\text{эфф}} = 1,257 \times 10^{-3} \times 2 \times 5,92 / 0,183 = 0,081.$$

Необходимое число витков

$$N = \sqrt{L/A_L} = \sqrt{88/0,081} = 32,9$$

округляем в большую сторону до 33 витков. Максимальный ток через дроссель

$$I_{\text{max}} = 240 \Delta_{\text{эфф}} / N = 240 \times 0,183 / 33 = 1,33 \text{ А}.$$

Максимальное сечение провода

$$S_{\text{пров}} = S_{\text{окн}} k_{\text{зап}} / N = 50,3 \times 0,3 / 33 = 0,457 \text{ мм}^2,$$

что соответствует плотности тока 1,25/0,457 = 2,74 А/мм<sup>2</sup>. Сечению S<sub>пров</sub> = 0,457 мм<sup>2</sup> соответствует диаметр:

$$d_{\text{пров}} = 2 \sqrt{S_{\text{пров}} / \pi} = 2 \sqrt{0,457 / 3,14} = 0,76 \text{ мм}.$$

Иногда удобнее ввести два одинаковых зазора. В этом случае табличное значение A<sub>L</sub> для половинного зазора следует уменьшить в два раза, а табличное значение I<sup>2</sup>L для половинного зазора — удвоить.

Технология введения зазора такова. Небольшое кольцо перед намоткой разломить на две части, надпилив его надфилем, лучше алмазным. Половинки склеивают между собой эпоксидным клеем с наполнителем, в качестве которого удобно использовать тальк. При склеивании в один из зазоров или в оба на часть глубины вводят прокладку из гетинакса, текстолита или нескольких слоев бумаги. Можно считать, что толщина одного листа бумаги для ксероксов и лазерных принтеров составляет 0,1 мм. Для сохранения формы кольца в процессе полимеризации клея оно должно лежать на обрезке органического стекла, от которого затем легко отделяется при изгибе этого обрезка. Перед намоткой острые грани колец следует тщательно скруглить небольшим наждачным камнем.

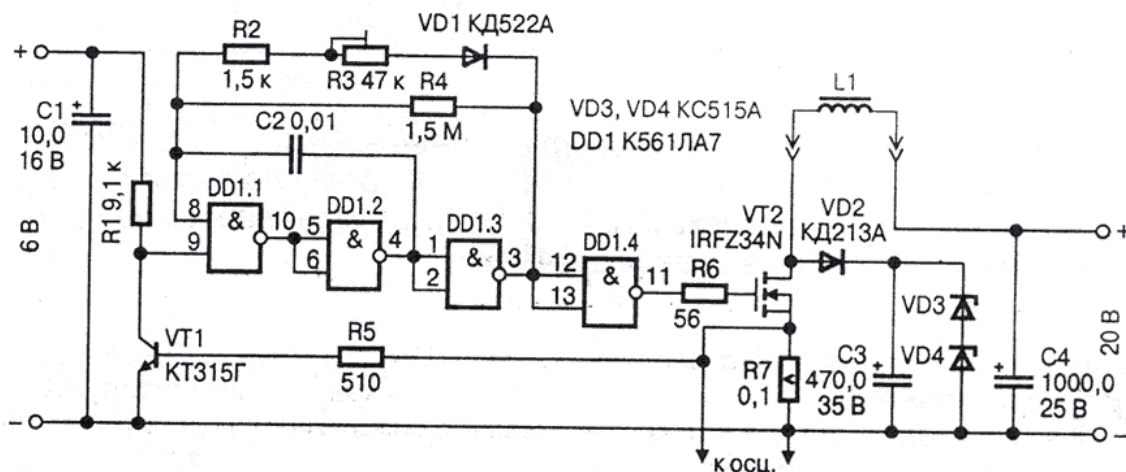


Рис. 3

У большого кольца зазор можно также выполнить ножовкой с алмазным полотном, однако его ширина при этом однозначно определяется толщиной полотна. В такой зазор для сохранения прочности кольца следует вклеить прокладку из жесткого диэлектрика.

Для экспериментальной проверки тока насыщения дросселей автором была изготовлена приставка к осциллографу, схема которой приведена на **Рис. 3**. Устройство представляет собой упрощенный вариант обратного преобразователя.

На микросхеме DD1 собран генератор импульсов положительной полярности длительностью, регулируемой в пределах 10...300 мкс с периодом повторения около 10 мс. Импульсы с его выхода поданы на затвор мощного, но низковольтного и относительно недорогого полевого транзистора VT2. Транзистор открывается и через проверяемую катушку индуктивности L1 начинает течь линейно нарастающий ток. Когда импульс заканчивается, накопленная энергия передается через диод VD2 в нагрузку, которой служат стабилитроны VD3 и VD4. Напряжение с резистора R7, пропорциональное току через катушку L1, подается на осциллограф. Для синхронизации осциллографа лучше использовать сигнал с выхода DD1.4. Если ток превысит 6А, откроется транзистор VT1 и оборвет формирование импульса. Пока сердечник катушки не входит в насыщение, зависимость тока от времени, как указывалось выше, носит линейный характер. При плавном увеличении длительности им-

пульсов и подходе максимального тока через дроссель к току насыщения на экране осциллографа хорошо видно резкое отклонение зависимости от линейной. Источник напряжением 20 В должен допускать выходной ток не менее 1 А. Для упрощения пользования приставкой можно цепь +6 В питать от цепи +20 В через микросхемный стабилизатор КР145ЕН5Б(Г), либо КР1157ЕН6 с любыми суффиксами (7806 или 78L06). Экспериментальная проверка изготовленных дросселей подтвердила точность расчета необходимого числа витков и тока насыщения порядка  $\pm 10\%$ , что можно считать неплохим результатом, учитывая ошибки установки ширины зазора и множество допущений при выводе формул.

#### Литература:

1. И. Н. Сидоров, А. А. Христинин, С. В. Скорняков. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники. Справочник. — М.: Радио и связь, 1989, с. 384.
2. А. Миронов. Магнитные материалы и магнитопроводы для импульсных источников питания. — Радио, 2000, №6, с. 53, 54.
3. Ферритовые магнитопроводы серии RM фирмы EPCOS. — Радио, 2001, №3, с. 49—51, №10, с. 48—50.
4. А. Кузнецов. Трансформаторы и дроссели для импульсных источников питания. — Схемотехника, 2000, №1, с. 30—33, №2, с. 48, 49, 2001, №1, с. 32—34.
5. С. Бирюков. Цифровой измеритель RCL. — Радио, 1996, №3, с. 38—41, №7, с. 62, 1997, №7, с. 32, 1998, №5, с. 63, 2001, №5, с. 44.
6. Г. Г. Гинкин. Справочник по радиотехнике. Изд. 4-е, переработанное. — М.: Госэнергоиздат, 1948, с. 816.

Сергей Бирюков,  
editor@dian.ru