



1.8. ДРОССЕЛИ В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Дросселем называют статическое электромагнитное устройство, используемое в электрических цепях в качестве индуктивного сопротивления. Различают три основных типа дросселей: дроссели переменного тока, дроссели фильтров выпрямителей (сглаживающие) и дроссели насыщения.

Дроссель переменного тока имеет одну обмотку, обтекаемую переменным током. *Сглаживающий дроссель* также имеет одну обмотку, но обтекается она пульсирующим выпрямленным током. *Дроссель насыщения* имеет не менее двух обмоток, одна из которых обтекается переменным, а другая — постоянным током.

В источниках электропитания ЭА применяют в основном сглаживающие дроссели. При дальнейшем изложении, если не будет специальных оговорок, под термином «дроссель» будем понимать сглаживающий дроссель электрического фильтра.

При изготовлении дросселей используют те же материалы, что и при изготовлении трансформаторов. В конструктивном оформлении и технологии изготовления трансформаторы и дроссели также имеют много общего. Однако в дросселях и трансформаторах электромагнитные процессы отличаются по своему характеру. Основное различие между ними заключается в том, что магнитный поток в магнитопроводе трансформатора определяется приложенным напряжением и практически не зависит от тока нагрузки, в то время как магнитный поток в магнитопроводе дросселя определяется током нагрузки.

Основными электрическими параметрами дросселя являются индуктивность L и *ток подмагничивания* I_0 [15]. Габаритные размеры дросселя определяются по *энергоемкости* E , рассчитываемой по формуле:

$$E = L(I_0^2 + I^2),$$

где I – действующее значение переменной составляющей пульсирующего тока, протекающего через обмотку дросселя.



Энергоемкость можно определить также по следующей формуле:

$$E = LI_n^2,$$

где I_n – действующее значение пульсирующего тока, протекающего по обмотке.

Отечественная промышленность серийно производит сглаживающие низковольтные дроссели, рассчитанные на рабочую температуру от -60 до $+85$ °С. Дроссели на базе ленточных магнитопроводов ШЛ и ШЛМ (тип Д) изготавливают из электротехнической стали. Их выпускают семи типоразмеров, 74 типонаименований. При этом охватывается диапазон индуктивностей от 0,00015 до 5 Гн, токов подмагничивания от 0,05 до 50 А, частот переменной составляющей от 50 до 5000 Гц.

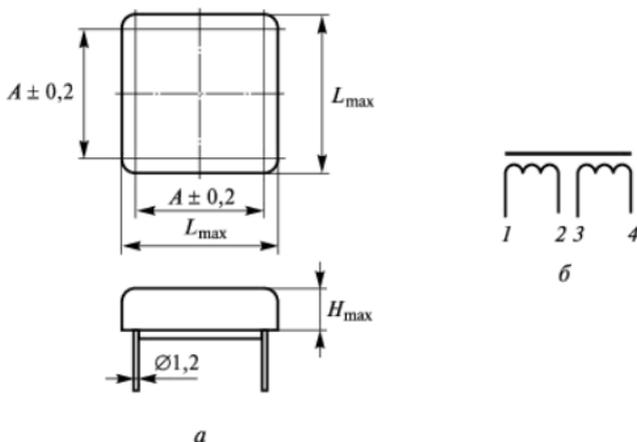


Рис. 1.8.1. Дроссель типа Д13:

a – общий вид; *б* – схема электрическая; 1, 2, 3, 4 – выводы

Дроссели типа Д13 изготавливают на кольцевых магнитопроводах из магнетодиэлектрика на основе пермаллоя марки 80Н2М. Они рассчитаны на диапазон частот 0,05...200 кГц и выпускаются в корпусном и бескорпусном исполнениях. На рис. 1.8.1 приведены общий вид и электрическая схема дросселей типа Д13 в корпусном исполнении, а в табл. 1.8.1 – параметры дросселей этого



типа в бескорпусном исполнении. Дроссели в бескорпусном исполнении применяются в герметизированных модулях.

Индуктивность дросселя L_f зависит от частоты f определяется выражением:

$$L_f = kL_{100},$$

где L_{100} – индуктивность при частоте 100 кГц (табл. 1.30); k – коэффициент, зависимость которого от частоты приведена в табл. 1.8.2.

При параллельном соединении обмоток допустимый ток увеличивается вдвое, а индуктивность уменьшается в 4 раза.

Для предотвращения насыщения магнитопровода дросселя в нем предусматривают немагнитный зазор, позволяющий получить минимальные массу и размеры дросселя. Такой дроссель можно приближенно считать индуктивностью с линейной характеристикой в широком диапазоне изменений максимального значения переменного напряжения. Это допущение нередко принимают и при расчетах дросселей с магнитопроводами без зазора из молибденового пермаллоя или феррита.

Таблица 1.8.1.

Значения номинальных параметров дросселей типа Д13 при последовательном соединении обмоток на частоте 100 кГц

Типономинал дросселя	Переменная составляющая напряжения U , В (эффективное значение)	Сопротивление обмотки при току R , Ом	Ток подмагничивания T_0 , А, не более	Индуктивность, мГн, не менее	Габаритные размеры $H \times L \times A$, мм	Масса, г
Д13-1	58	0,45	0,5	0,315	7,5 x 15 x 10	5
Д13-2	33	0,125	1,0	0,08		
Д13-3	12	0,015	4,0	0,005		
Д13-4	47	0,2	1,0	0,2	10 x 17 x	8



Д13-5	18	0,03	4,0	0,0125	11,25	
Д13-6	100	0,75	0,5	1,25	11 x 18 x 12,5	10
Д13-7	48	0,35	2,0	0,315		
Д13-8	15	0,25	4,0	0,02		
Д13-9	132	0,8	0,5	2,0	11 x 19 x 15	12
Д13-10	34	0,3	1,0	0,5		
Д13-11	16	0,025	4,0	0,0315		
Д13-12	200	0,75	0,5	3,15	12 x 22 x 17,5	25
Д13-13	120	0,4	1,0	0,8		
Д13-14	30	0,025	4,0	0,05		
Д13-15	122	0,45	1,0	1,25	15,5 x 29 x 2,5	40
Д13-16	34	0,05	4,0	0,08		
Д13-17	210	0,6	1,0	2,0	13 x 30 x 25	45
Д13-18	34	0,065	4,0	0,125		
Д13-19	135	0,9	1,0	5,0	16 x 36 x 30	62
Д13-20	74	0,075	4,0	0,315		
Д13-21	10	0,01	16,0	0,02		
Д13-22	25	0,025	8,0	0,08		

Таблица 1.8.2.
Зависимость коэффициента k от частоты

k	1,2	1,1	1,0	0,8
f , кГц	20	50	100	200

Рассмотрим методику расчета дросселя без зазора, обеспечивающую приемлемую точность оценки его параметров. При расчете принимается условие, что дроссель включен в цепь высокочастотного ИЭП и понемногу проходит переменный ток прямоугольной формы. По обмотке дросселя проходит также постоянный ток (ток подмагничивания).



Свойства магнитопровода описываются кривой намагничивания, однако для упрощения расчетов принимается обратная ей зависимость напряженности поля H от индукции B . Прямолинейный участок этой зависимости можно представить следующей зависимостью:

$$H = H_n(B/B_s), \quad (1.8.1)$$

где H_n – нормирующее значение напряженности поля; B_s – индукция насыщения, а дальнейший изгиб и стремление к бесконечности при $B \rightarrow B_s$, учитывается введением в выражение (1.8.1) так называемой формирующей функции $\varphi(B/B_s)$:

$$H = H_n(B/B_s)\varphi(B/B_s). \quad (1.8.2)$$

Для магнитодиэлектриков типа молибденовых пермаллоев можно применять формирующую функцию:

$$\varphi(B/B_s) = 1 / \sqrt{\cos\left(\frac{\pi B^2}{2 B_s^2}\right)},$$

с учетом которой аппроксимирующая зависимость (1.8.2) принимает вид:

$$H = H_n \frac{(B/B_s)}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi B^2}{2 B_s^2}\right)}} \quad (1.8.3)$$

Значения коэффициентов аппроксимации H_n и B_s некоторых марок магнитодиэлектриков приведены в табл. 1.8.3.

Рабочий режим дросселя задается максимальным значением и частотой приложенного к дросселю переменного напряжения, а также максимальным значением тока подмагничивания. В качестве показателей качества дросселя принимаются его масса, объем, пульсации тока, диапазон изменения тока подмагничивания, не приводящий к разрыву полного тока, омическое сопротивление обмотки дросселя.



Таблица 1.8.3.

Значения коэффициентов аппроксимации магнитопроводов дросселей

Марка магнитодиэлектрика	H_n	B_s
МП-6	5900	0,47
МП-100	6100	0,73
МП-140	5400	0,735
МП-160	4180	0,742
МП-250	2830	0,764
ТЧ-90	5950	0,6

Рассмотрим работу дросселя в случае, когда к нему приложено переменное напряжение прямоугольной формы с частотой f , длительностью положительной части периода τ и отрицательной части периода θ . Пусть U_+ и U_- – максимальные значения напряжения положительной и отрицательной частей периода. Изменению напряжения от U_+ до U_- соответствует изменение индукции в магнитопроводе. В положительную часть периода индукция увеличивается от B_{max} до B_{min} , в отрицательную часть периода снижается от B_{max} до B_{min} (рис. 1.8.2, а).

Если B_0 – постоянная составляющая магнитной индукции, а B_M – максимальное значение переменной составляющей, то:

$$B_{max} = B_0 + B_M \text{ и } B_{min} = B_0 - B_M.$$

В соответствии с рис. 1.8.2 нарастание и спад магнитной индукции описываются следующими выражениями положительной части периода:

$$B(t) = B_0 + B_M \left(\frac{2t}{\tau} - 1 \right), 0 < t < \tau; \quad (1.8.4)$$

в отрицательной части периода:

$$B(t) = B_0 + B_M \left[\frac{2(t - \tau)}{\theta} - 1 \right], \tau < t < \tau + \theta.$$

Напряженность магнитного поля H_0 , соответствующая индукции B_0 , определяется выражением:

$$H_0 = I_0 W / l,$$

где W – число витков обмотки дросселя; l – длина средней магнитной линии.

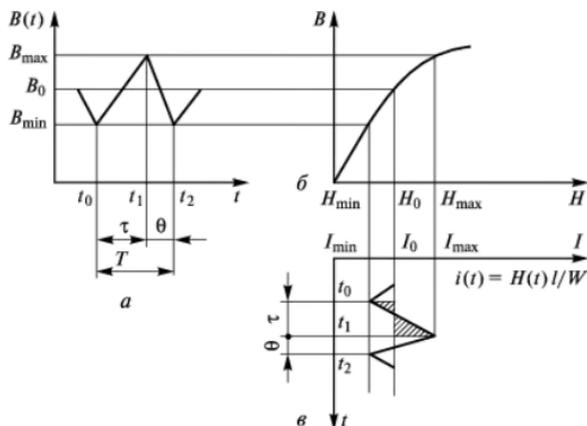


Рис. 1.8.2. График изменения магнитной индукции (а), кривая намагничивания (б) и график изменения напряженности магнитного поля (в) в магнитопроводе дросселя

Максимальное значение переменной составляющей индукции определяется зависимостью:

$$B_M = \frac{U_+}{4fQW} \frac{2\tau}{T} = \frac{U_-}{4fQW} \frac{2\theta}{T}, \quad (1.8.5)$$

где T – длительность периода, 1/Гц; Q – площадь сечения магнитопровода, м²; W – число витков обмотки дросселя. Отсюда:

$$W = \frac{U_+}{4fQW} \frac{2\tau}{T}. \quad (1.8.6)$$



Постоянная составляющая напряженности магнитного поля:

$$H_0 = \frac{I_0 W}{l} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} H(t) dt.$$

Заменим переменную интегрирования $H(t)$ на $B(t)$. Из выражения (1.8.5) определим производную dB/dt и соответственно пределы интегрирования. Тогда с учетом аппроксимации (1.8.4) получим:

$$\frac{I_0 W}{l} = \frac{1}{\tau} \frac{dt}{dB} \int_{B_{min}}^{B_{max}} H(B) dB = \frac{H_S B_S}{2B_M} \int_{\frac{B_{min}}{B_S}}^{\frac{B_{max}}{B_S}} \frac{\frac{B}{B_S}}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi B^2}{2 B_S^2}\right)}} \frac{dB}{B_S}.$$

Эллиптический интеграл в нормальной форме имеет следующий вид:

$$\frac{I_0 W}{l} = \frac{H_H B_S}{\pi B_M} \frac{1}{\sqrt{2}} \left[F\left(\alpha_{max}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) - F\left(\alpha_{min}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \right].$$

Здесь $F(\alpha, 1/\sqrt{2})$ – эллиптический интеграл первого рода от аргумента α с модулем $(1/\sqrt{2})$; $\alpha_{max} = \arcsin(\sqrt{2} \sin \frac{\pi x^2}{2})$ – аргумент при максимальной магнитной индукции; $\alpha_{min} = \arcsin(\sqrt{2} \sin \frac{\pi y^2}{2})$ – аргумент при минимальной магнитной индукции; $x = B_{max}/B_S$ и $y = B_{min}/B_S$ – относительные значения максимальной и минимальной индукций.

Определим объем магнитопровода $Ql = V$:

$$V = \frac{I_0 U_+}{f H_S B_S} \frac{2\tau}{T} \frac{\pi}{2 \sqrt{2[F(\alpha_{max}, 1/\sqrt{2}) - F(\alpha_{min}, 1/\sqrt{2})]}}.$$

Таким образом, объем магнитопровода дросселя зависит от условий его работы, материала магнитопровода и режима намагничивания.



С целью упрощения анализа работы дросселя вводится так называемый *параметр режима работы*:

$$m = 2\sqrt{2} \left[F \left(\alpha_{max}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right) - F \left(\alpha_{min}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right] / \pi ,$$

в результате чего упрощается выражение для объема магнитопровода:

$$V = \frac{I_0 U_+ (2\tau/T)}{f H_s B_s} \frac{1}{m} .$$

Пульсации тока дросселя определяются коэффициентом k_{Π} :

$$k_{\Pi} = (I_{max} - I_{min}) 2I_0 .$$

Коэффициент пульсации можно также найти по протяженности рабочего участка на кривой намагничивания:

$$k_{\Pi} = (1/2I_0 W)(H_{max} - H_{min}) .$$

Уравнение приводится к следующему виду:

$$k_{\Pi} = \frac{2fB_m H_n V}{U_+ I_0 (2\tau/T)} \left(\frac{x}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi}{2}x^2\right)}} - \frac{y}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi}{2}y^2\right)}} \right) .$$

Соотношение для оценки пульсаций имеет вид:

$$k_{\Pi} = (x - y) \left(\frac{x}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi}{2}x^2\right)}} - \frac{y}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi}{2}y^2\right)}} \right) \frac{1}{m} .$$



Разность $(x - y)$ определяет максимальное значение переменной составляющей магнитной индукции, поэтому число витков в обмотке дросселя обратно пропорционально указанной разности:

$$W = U_+ \left(\frac{2\tau}{T} \right) 2fQB_s(x - y).$$

Для конкретного магнитопровода заданного объема существует некоторое максимальное значение разности относительных индукций $(x - y)_{max}$. Значениям $(x - y)_{max}$ соответствуют обмотки с наименьшим числом витков. Дроссель с заданными пульсациями k_{Π} ; при значениях $x - y > (x - y)_{max}$ можно выполнить, приняв меньшее значение параметра режима m , т.е. на магнитопроводе большего объема. При заданной площади окна магнитопровода, который определен принятым значением m , можно выбрать максимальный диаметр намоточного провода и определить минимальное омическое сопротивление обмотки.

При расчете дросселей используют следующие рекомендации.

1. Диапазон изменения тока подмагничивания N , не приводящий к появлению разрывного тока в дросселе, определяется из соотношения:

$$N = m/(x - y)^2. \quad (1.8.16)$$

2. Для дросселей с минимальными объемом и массой, и произвольным омическим сопротивлением обмотки:

$$k_{\Pi min} = 0,73m + 0,175m^2 \approx 0,73m;$$

$$N \approx m/(0,5)^2 m^2 = 4/m;$$

$$(x - y)_{min} = 0,5m.$$

3. Для дросселей с минимальными объемом, массой и омическим сопротивлением обмотки:

$$k_{\Pi.0} = 0,9m + 0,45m^2 \approx 0,9m;$$

$$N = 1,57/m;$$

$$(x - y)_0 = 0,798m.$$