

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/313987927>

Методика расчета дросселей входного и выходного фильтров сварочных инверторных источников питания при использовании стандартных магнитопроводов / Procedure of calcul....

Article in *Avtomatičeskaâ svarka (Kiev)* · April 1997

CITATIONS

0

READS

479

4 authors, including:



Igor Pentegov

E.O. Paton Electric Welding Institute

116 PUBLICATIONS 73 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sergii Rymar

E.O. Paton Electric Welding Institute

117 PUBLICATIONS 42 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Electrothermics [View project](#)

УДК 621.791.75.037:621.314.572:621.318.435.001.24

И. В. Пентегов, д-р техн. наук, С. Н. Мещеряк, канд. техн. наук, М. В. Турты, С. В. Рымар, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДРОССЕЛЕЙ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО ФИЛЬТРОВ СВАРОЧНЫХ ИНВЕРТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТАНДАРТНЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ

Ключевые слова: дуговая сварка, инверторные источники питания, резонансные инверторы, дроссели фильтров, магнитопроводы, расчеты, Украина

Известные методики расчетов дросселей фильтров резонансных инверторов [1–3], которые в основном используются в тиристорных инверторных источниках питания для дуговой сварки [4, 5], не учитывают эффектов, возникающих в связи с нелинейностью характеристик ферромагнитных материалов магнитопроводов дросселей. Эти методики используют линейное приближение характеристик ферромагнитных материалов в ненасыщенном состоянии. Дроссели, рассчитанные с таким приближением, заведомо недогружены и имеют неоправданно большую массу и стоимость.

Предлагаемая методика использует режим глубокого насыщения магнитопровода дросселей, работающих на максимальных токах. Это позволяет уменьшить их массу и стоимость, получить требуемую регулировочную характеристику, сохранить приемлемые фильтрующие свойства дросселя во всем диапазоне изменения токов. Несмотря на большие значения магнитной индукции, магнитопровод не перегревается, так как при выпрямленном пульсирующем токе, протекающем в таких дросселях, потери в магнитопроводе на гистерезис и от вихревых токов малы.

На рис. 1 показано изменение тока дросселя i во времени t при максимальном (ломаная 1) и минимальном (ломаная 2) уровнях сварочного тока в инверторных источниках питания. Обозначим через $\Delta t_{\min}$ и $\Delta t_{\max}$ промежутки времени в интервалах уменьшения значения тока между его максимумами и минимумами, а через $\Delta I_{\max}$ и $\Delta I_{\min}$ — допустимый размах пульсаций тока при значениях токов, соответствующих номинальному I_n и наименьшему $I_{n\min}$ уровням тока. Отношение $\Delta I_{\min}/I_{n\min}$ может быть больше отношения $\Delta I_{\max}/I_n$, так как логарифм интенсивности звука (дБ), пропорционален следующим величинам [6]:

для минимального уровня тока —

$$I_{n\min}^{1,5(1+g)} \left(\frac{\Delta I_{\min}}{I_{n\min}} \right)^2;$$

для номинального уровня тока —

$$I_n^{1,5(1+g)} \left(\frac{\Delta I_{\max}}{I_n} \right)^2.$$

Здесь g — безразмерный показатель степени ($g=0$ для вольт-амперных характеристик, независимых от тока; $g=-1/3$ для свободно горящих дуг; $g=-1$ для обжатых дуг постоянной мощности). В случае работы на малых токах при $g>-1$ можно допустить относительно большие пульсации, не опасаясь превысить предельно допустимый уровень интенсивности звука.

В интервалы времени $\Delta t_{\min}$ и $\Delta t_{\max}$, когда ток в цепи поддерживается за счет энергии дросселя, справедливо уравнение

$$L_d \frac{di}{dt} = -U, \quad (1)$$

где L_d — динамическая (дифференциальная) индуктивность дросселя; U — номинальное напряжение на нагрузке. Для выходного дрос-

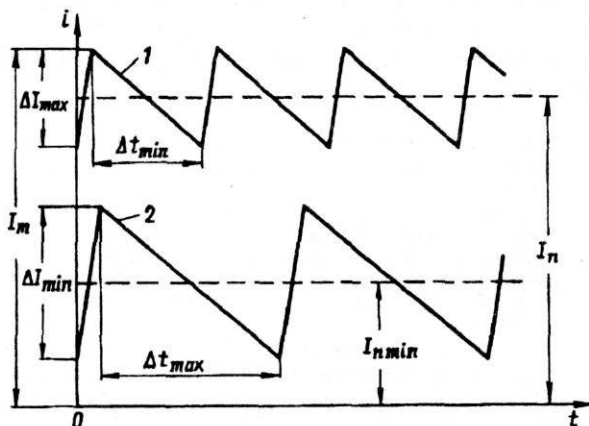


Рис. 1. Изменение тока i дросселя во времени t на максимальном и минимальном уровнях

селя $U = U_d$ (U_d — напряжение на дуге), для входного дросселя $U = U_c$ (U_c — напряжение на конденсаторах входного фильтра).

Работа дросселя фильтра предполагает обеспечение минимального $L_{\min}$ и максимального $L_{\max}$ значений индуктивности нелинейного дросселя на уровнях больших и малых токов. Из формулы (1) при $di = -\Delta I_{\max}$ и $dt = \Delta t_{\min}$ следует, что индуктивность

$$L_{\min} = U \frac{\Delta t_{\min}}{\Delta I_{\max}} \quad (2)$$

аналогично при $di = -\Delta I_{\min}$ и $dt = \Delta t_{\max}$ индуктивность

$$L_{\max} = U \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta I_{\min}} \quad (3)$$

Если требуемые значения индуктивности $L_{\min}$ и $L_{\max}$ выбираются из других соображений, то они вводятся в расчет как заданные.

Из теории нелинейных цепей [7] известно, что этим значениям должна удовлетворять динамическая индуктивность L_d :

$$L_d = \frac{d\psi}{di} = W S_c \frac{dB}{di} \quad (4)$$

где ψ — потокосцепление; W — количество витков дросселя; B — магнитная индукция в магнитопроводе; $S_c = k_c ab$ — активная площадь поперечного сечения магнитопровода; $k_c = 0,92 \dots 0,97$ — коэффициент заполнения магнитопровода сталью (для магнитопроводов из феррита $k_c = 1$).

В рассматриваемой конструкции дросселя (рис. 2) влияние полей рассеяния в окне магнитопровода на динамическую индуктивность L_d мало, и им можно пренебречь.

Для определения величины dB/di применим закон полного тока:

$$iW = H(B)l_c + \frac{k_c B}{k_a \mu_0} \delta_c \quad (5)$$

где $H(B)$ — напряженность магнитного поля в магнитопроводе, являющаяся функцией магнитной индукции B ; k_a — коэффициент выпучивания магнитного потока в области воздушного зазора δ_c ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м. В дросселях рассматриваемого типа физический зазор, равный $\delta_c/2$, составляет 0,5...2,0 мм, что на два порядка меньше геометрических размеров периметров сечений стержней магнитопровода $2(a+b)$. При таких соотношениях размеров магнитными полями рассеяния вне области выпучивания можно пренебречь и значение коэффициента k_a с большой степенью точности приравнять к 1,1.

Для амплитудных значений выражение (5) примет вид

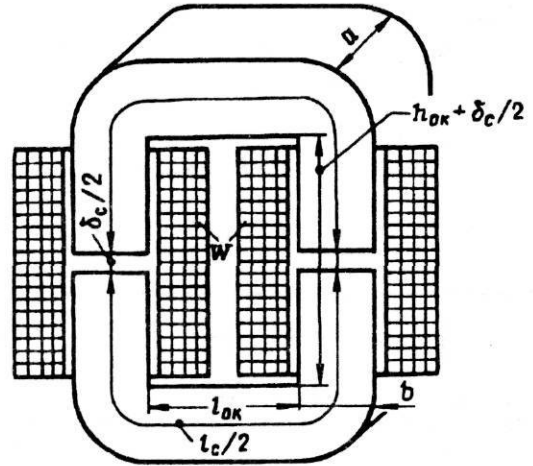


Рис. 2. Конструкция дросселя с ленточным магнитопроводом: $h_{ок}$ — высота окна магнитопровода, без учета воздушного зазора δ_c в магнитопроводе; $l_{ок}$ — ширина окна магнитопровода; a, b — соответственно ширина и толщина стержня магнитопровода; l_c — средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе без учета воздушного зазора ($l_c = 2(h_{ок} + l_{ок}) + \pi b$)

$$I_m W = H(B_m) l_c + \frac{k_c B_m}{k_a \mu_0} \delta_c \quad (6)$$

здесь B_m — амплитудное значение магнитной индукции, соответствующее наибольшему амплитудному значению тока $I_m = I_n + \Delta I_{\max}/2$.

Важно, чтобы дроссель не насыщался выше выбранного уровня при наибольшей амплитуде тока I_m , в противном случае он теряет свои фильтрующие свойства.

Дифференцируя выражение (5), находим

$$\frac{di}{dB} = \frac{1}{W} \left(l_c \frac{dH}{dB} + \frac{\delta_c k_c}{k_a \mu_0} \right) \quad (7)$$

отсюда, используя формулу (4), получим динамическую индуктивность

$$L_d = W^2 S_c \left(l_c \frac{dH}{dB} + \frac{\delta_c k_c}{k_a \mu_0} \right)^{-1} \quad (8)$$

Из выражения (8) при токе, равном амплитудному значению I_m , для магнитной индукции $B = B_m$ определяем индуктивность $L_{\min}$, а при малых токах, если $B \rightarrow 0$, индуктивность $L_{\max}$ составляет:

$$L_{\min} = \frac{W^2 S_c}{l_c} \left(\frac{dH}{dB} \Big|_{B=B_m} + \frac{k_c \delta_c}{k_a \mu_0 l_c} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$L_{\max} = \frac{W^2 S_c}{l_c} \left(\frac{dH}{dB} \Big|_{B=0} + \frac{k_c \delta_c}{k_a \mu_0 l_c} \right)^{-1} \quad (10)$$

Разделим выражение (9) на (10):

$$\frac{L_{\min}}{L_{\max}} = \frac{\frac{dH}{dB} \Big|_{B=0} + \frac{k_c \delta_c}{k_a \mu_0 l_c}}{\frac{dH}{dB} \Big|_{B=B_m} + \frac{k_c \delta_c}{k_a \mu_0 l_c}} \quad (11)$$

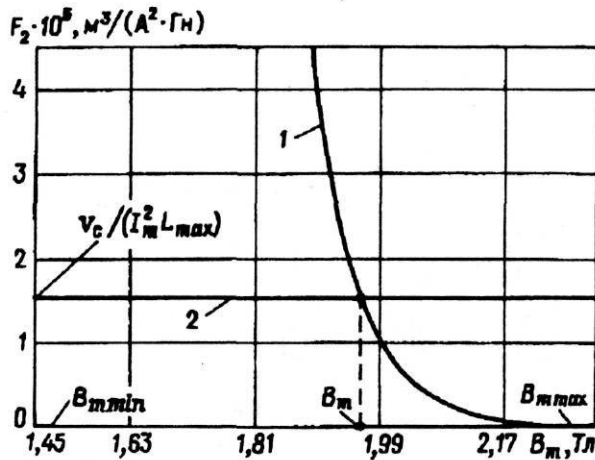


Рис. 3. К графическому определению амплитудного значения магнитной индукции B_m в магнитопроводе дросселя и решим полученное уравнение относительно δ_c/l_c :

$$\frac{\delta_c}{l_c} = \frac{\mu_0 k_a}{k_c} \times \left(\frac{L_{\min}}{L_{\max}} \frac{dH}{dB} \Big|_{B=B_m} - \frac{dH}{dB} \Big|_{B=0} \right) = \frac{\mu_0 k_a}{k_c} F_1(B_m). \quad (12)$$

Умножив правую и левую части выражения (10) соответственно на квадраты правой и левой частей выражения (6) и учитывая, что объем магнитопровода $V_c = S_c l_c$, получим

$$\frac{V_c}{I_m^2 L_{\max}} = \left[\frac{dH}{dB} \Big|_{B=0} + \frac{k_c \delta_c}{k_a \mu_0 l_c} \right] \frac{1}{\left[H(B_m) + \frac{k_c \delta_c B_m}{k_a \mu_0 l_c} \right]^2} = \left[\frac{dH}{dB} \Big|_{B=0} + F_1(B_m) \right] \frac{1}{\left[H(B_m) + B_m F_1(B_m) \right]^2} = F_2(B_m). \quad (13)$$

Уравнение (13) имеет решение, если значения B_m лежат в интервале

$$B_{m\min} < B_m < B_{m\max}. \quad (14)$$

Неравенства (14) следуют из уравнения (12), причем $B_m = B_{m\min}$ при $\delta_c/l_c = 0$, а $B_m = B_{m\max}$ при $\delta_c/l_c = 1$. Минимальное $B_{m\min}$ и максимальное $B_{m\max}$ значения магнитных индукций определяются из уравнения (11), если известна зависимость напряженности магнитного поля от магнитной индукции в магнитопроводе $H(B)$. Задавая ряд значений B_m в этом интервале, по выражению (13) можно построить кривую зависимости $F_2(B_m)$ для заданного отношения $L_{\min}/L_{\max}$ с учетом характеристик выбранного материала магнитопровода (рис. 3). Неравенства (14) позволяют также определить диапазон изменения объема магнитопровода

$$V_{c\min} < V_c < V_{c\max}.$$

Минимальное $V_{c\min}$ и максимальное $V_{c\max}$ значения объема, при которых можно выполнить дроссель, определяются по формулам, получаемым из уравнения (13):

$$\begin{aligned} V_{c\min} &= F_2(B_{m\max}) I_m^2 L_{\max}; \\ V_{c\max} &= F_2(B_{m\min}) I_m^2 L_{\max}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $F_2(B_{m\min})$, $F_2(B_{m\max})$ — соответственно максимальное и минимальное значения данной функции.

Используя выражение (15), находим значения объемов $V_{c\min}$ и $V_{c\max}$, задающие интервал изменения необходимых значений V_c . Для улучшения массо-габаритных характеристик дросселя при выборе объема V_c , необходимо учитывать, что, чем меньше его значение, тем больше объем активного материала обмотки V_o .

Расчет ведется в следующей последовательности: абсцисса точки пересечения кривой $F_2(B_m)$ на рис. 3 с горизонтальной прямой, которая отсекает на оси ординат значение $V_c/(I_m^2 L_{\max})$, дает искомое значение амплитуды магнитной индукции B_m (если пересечения нет, нужно выбрать магнитопровод другого объема); по выражению (12) определяются значение функции $F_1(B_m)$ и отношение δ_c/l_c ; количество витков W с округлением до ближайшего большего целого числа (четного, при включении катушек на стержнях последовательно) находится по преобразованной формуле (6) с учетом выражения (12):

$$W = \frac{l_c}{I_m} \left[H(B_m) + B_m F_1(B_m) \right]. \quad (16)$$

В предлагаемой методике возможность получения аналитических решений зависит от вида используемой аппроксимации $H(B)$ для нисходящей предельной петли гистерезиса (рабочие частные циклы гистерезиса располагаются вблизи этой кривой). Для ферромагнитных материалов (стали, ферриты) в первом приближении нелинейность нисходящей петли гистерезиса может быть учтена аппроксимацией вида [9]

$$H(B) = \alpha_c \operatorname{sh}(\beta_c B) + \kappa_c B, \quad (17)$$

где α_c , β_c , κ_c — коэффициенты аппроксимации. Для наиболее распространенных холоднокатаных анизотропных электротехнических сталей (ЭТС) и ферритов коэффициенты аппроксимации [9, 10] приведены в табл. 1 и 2.

Для аппроксимации (17):

$$\frac{dH}{dB} \Big|_{B=B_m} = \alpha_c \beta_c \operatorname{ch}(\beta_c B_m) + \kappa_c; \quad (18)$$

$$\frac{dH}{dB} \Big|_{B=0} = \alpha_c \beta_c + \kappa_c. \quad (19)$$

Таблица 1

Марка ЭТС	δ_c , мм	α_c , А/м	β_c , Тл ⁻¹	κ_c , м/Гн
3404	0,30	$1,525 \cdot 10^{-7}$	12,643	18,425
3404	0,35	$1,525 \cdot 10^{-7}$	12,643	18,425
3405	0,30	$1,992 \cdot 10^{-8}$	13,552	16,854
3405	0,35	$5,068 \cdot 10^{-8}$	13,096	15,068
3406	0,27	$1,068 \cdot 10^{-8}$	13,790	14,268
3406	0,30	$1,067 \cdot 10^{-8}$	13,789	14,267
3406	0,35	$2,138 \cdot 10^{-8}$	13,534	14,615
3407	0,30	$2,000 \cdot 10^{-9}$	14,570	12,750
3407	0,35	$6,000 \cdot 10^{-9}$	14,040	14,059
3408	0,30	$4,418 \cdot 10^{-10}$	15,330	12,360
3408	0,35	$3,964 \cdot 10^{-10}$	15,443	14,713
3413	0,35	$3,397 \cdot 10^{-7}$	12,355	20,690
3413	0,50	$2,348 \cdot 10^{-8}$	14,012	25,000
3414	0,50	$5,261 \cdot 10^{-8}$	13,417	16,667

Примечание. Для указанных марок сталей удельное электрическое сопротивление $\rho_c = 4,7 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, плотность $\gamma_c = 7650$ кг/м³, индукция насыщения $B_s = 2,03$ Тл.

При этих значениях формула (11) примет вид

$$\frac{L_{\min}}{L_{\max}} = \frac{\alpha_c \beta_c + \kappa_c + \frac{k_c \delta_c}{k_b \mu_0 l_c}}{\alpha_c \beta_c \operatorname{ch}(\beta_c B_m) + \kappa_c + \frac{k_c \delta_c}{k_b \mu_0 l_c}} \quad (20)$$

В случае заданного отношения индуктивности $L_{\min}/L_{\max}$ решение уравнения (20) относительно $B_{\min}$ при $\delta_c/l_c = 0$ и $B_{\max}$ при $(\delta_c/l_c) = 1$ дает выражения:

$$B_{\min} = \frac{1}{\beta_c} \operatorname{arch} \left[\frac{L_{\max}}{L_{\min}} + \frac{\kappa_c}{\alpha_c \beta_c} \left(\frac{L_{\max}}{L_{\min}} - 1 \right) \right]; \quad (21)$$

$$B_{\max} = \frac{1}{\beta_c} \operatorname{arch} \left[\frac{L_{\max}}{L_{\min}} + \frac{\kappa_c + k_c/(\mu_0 k_b)}{\alpha_c \beta_c} \left(\frac{L_{\max}}{L_{\min}} - 1 \right) \right]. \quad (22)$$

Для принятой аппроксимации выражения (12) и (13) приобретают вид:

$$F_1(B_m) = \frac{\frac{L_{\min}}{L_{\max}} [\alpha_c \beta_c \operatorname{ch}(\beta_c B_m) + \kappa_c] - \alpha_c \beta_c - \kappa_c}{1 - \frac{L_{\min}}{L_{\max}}}; \quad (23)$$

$$F_2(B_m) = \frac{\alpha_c \beta_c + \kappa_c + F_1(B_m)}{[\alpha_c \operatorname{sh}(\beta_c B_m) + \kappa_c B_m + B_m F_1(B_m)]^2}. \quad (24)$$

Используя формулы (21)–(24), находим $F_2(B_{\min})$ и $F_2(B_{\max})$, а также границы значений объемов $V_{c \max}$ и $V_{c \min}$, внутри которых надлежит выбирать объем магнитопровода V_c .

Для выбранного магнитопровода с объемом V_c искомое значение магнитной индукции B_m при номинальном токе определяется из решения трансцендентного уравнения

$$F_2(B_m) = \frac{V_c}{(I_m^2 L_{\max})}. \quad (25)$$

Таблица 2

Марка феррита	α_c , А/м	β_c , Тл ⁻¹	χ_c , м/Гн	B_s , Тл
2500НМС1	0,023351	21,478	142,17	0,48
3000НМС	0,192578	18,812	104,95	0,46

Примечание. Для указанных марок феррита удельное электрическое сопротивление $\rho_c = 1$ Ом·м, плотность $\gamma_c = 5000$ кг/м³.

Решение уравнения (25) может быть получено численно или графически, как было показано на рис. 3. После нахождения значения B_m определяются значения $H(B_m)$ и $F_1(B_m)$ из выражений соответственно (17) и (23), после чего по формуле (16) находится округленное количество витков W .

Пусть выбранный магнитопровод имеет следующие геометрические параметры: a , b , $h_{ок}$, $l_{ок}$, l_c и S_c . Сечение проводника дросселя определяется из выражения

$$S_{np} = \frac{I_n}{J_{дл}} \left(\frac{\text{ПН}}{100} \right)^{1/2} \quad (26)$$

и округляется до значения стандартного сечения. Здесь $J_{дл}$ — задаваемая длительно допустимая плотность тока; ПН — коэффициент продолжительности нагрузки, %.

Максимальное количество витков, которое может вместиться в окне магнитопровода, составляет

$$W_{\max} = \frac{k_{ок} S_{ок}}{S_{np}}, \quad (27)$$

где $k_{ок} = 0,25 \dots 0,45$ — коэффициент заполнения окна проводником; $S_{ок} = l_{ок}(h_{ок} + 0,5\delta_c)$ — площадь окна. Если $W \leq W_{\max}$ — дроссель может быть выполнен, если $W > W_{\max}$ — нужно взять другой магнитопровод с большей площадью окна.

После округления количества витков W и при сохранении неизменным заданного значения индуктивности $L_{\max}$ уточняются расчетные значения $L_{\min}$, δ_c и B_m . Уточненное значение воздушного зазора в магнитопроводе определяется из выражений (10) и (19):

$$\delta_c = \frac{\mu_0 k_b}{k_c} \left[\frac{S_c W^2}{L_{\max}} - (\alpha_c \beta_c + \kappa_c) l_c \right]. \quad (28)$$

Уточненное амплитудное значение магнитной индукции B_m определяется посредством численного или графического решения уравнения (6). Значение $L_{\min}$ находится из формулы (9) с учетом выражения (18).

На основании выражений (8) и (5) запишем уравнение регулировочной характеристики дросселя $L_d(I)$ в параметрической форме:

$$L_d(B) = \frac{W^2 S_c}{l_c} \left(\frac{dH}{dB} + \frac{k_c \delta_c}{k_a \mu_0 l_c} \right)^{-1}; \quad (29)$$

$$I(B) = \frac{1}{W} \left(H(B) l_c + \frac{k_c B \delta_c}{k_a \mu_0} \right),$$

где текущее значение магнитной индукции B играет роль параметра. При этом уточненные предельные значения индуктивности дросселя определяются по формулам:

$$L_{\max} = L_d(O); \quad (30)$$

$$L_{\min} = L_d(B_m).$$

Рассмотрим потери в стальном магнитопроводе дросселя, в котором изменение магнитной индукции происходит по частным установившимся петлям гистерезиса, образующимся вблизи нисходящей предельной петли гистерезиса. При работе на узких частных петлях потери на гистерезис пренебрежимо малы по сравнению с потерями от вихревых токов P_v , поэтому потери в магнитопроводе могут быть рассчитаны по формуле [11]

$$P_v = \frac{V_c (b_c U_{др})^2}{12 \rho_c (W S_c)^2}, \quad (31)$$

где b_c — толщина проката ЭТС; ρ_c — удельное электрическое сопротивление ЭТС; $U_{др}$ — эффективное напряжение на дросселе, для которого справедливы следующие неравенства:

$$U_{x,x} > U_{др} > 0,7 U_{x,x} -$$

для выходного дросселя;

$$U_1 > U_{др} > 0,7 U_1 -$$

для входного дросселя ($U_{x,x}$, U_1 — соответственно действующие значения напряжения холостого хода инверторного источника питания и напряжения сети).

Формула (31) при использовании этих неравенств позволяет оценить потери от вихревых токов в дросселе при выбранной толщине листа b_c .

Определим коэффициент k_p как отношение потерь:

$$k_p = \frac{P_v}{P_o}; \quad (32)$$

здесь

$$P_o = R_o I_a^2 -$$

мощность джоулевых потерь в обмотке;

$$R_o = \frac{\rho_o W l_{ср.в}}{S_{np}} -$$

активное сопротивление обмотки; ρ_o — удельное электрическое сопротивление активного материала обмотки;

$$l_{ср.в} = 2(a + b) + \frac{0,5 \pi l_{ок} W}{W_{max}} -$$

средняя длина витка обмотки.

Приемлемые значения коэффициента k_p лежат в интервале 0,1...0,3. Если считать значение k_p заданным, то для выходного дросселя можно определить требуемую толщину листа ЭТС:

$$b_c \leq \frac{W S_c}{0,7 U_{x,x}} \sqrt{12 \rho_c k_p \frac{P_o}{V_c}}. \quad (33)$$

Для входного дросселя в формулу (33) вместо $U_{x,x}$ необходимо подставлять значение U_1 . Формула (33) позволяет оценить диапазон частот, при которых целесообразно использовать магнитопровод из ЭТС. Зная, что объем магнитопровода $V_c = S_c l_c$, умножим правые и левые части этого равенства на соответствующие части уравнения (9). После преобразования с использованием формулы (18), получим

$$V_c = \frac{(W S_c)^2}{L_{\min}} \left(\alpha_c \beta_c \operatorname{ch}(\beta_c B_m) + \chi_c + \frac{k_c \delta_c}{k_a \mu_0 l_c} \right)^{-1}. \quad (34)$$

Подставив формулу (34) в выражение (33), найдем требуемую толщину листа ЭТС:

$$b_c \leq \frac{1}{0,7 U_{x,x}} \times \sqrt{12 \rho_c k_p P_o L_{\min} \left(\alpha_c \beta_c \operatorname{ch}(\beta_c B_m) + \chi_c + \frac{k_c \delta_c}{k_a \mu_0 l_c} \right)}. \quad (35)$$

Толщина листа b_c пропорциональна $L_{\min}^{1/2}$. Согласно выражению (2), можно записать

$$b_c \approx \Delta l_{\min}^{1/2} = f^{-1/2},$$

где f — частота пульсаций тока в дросселе.

Если для какого-нибудь значения частоты пульсаций f определена толщина листа $b_{cf} = b_c$ по формуле (35), то максимально допустимое значение частоты пульсаций можно оценить с помощью выражения

$$f_{\max} = \left(\frac{b_{cf}}{b_{c\min}} \right)^2 f, \quad (36)$$

здесь $b_{c\min}$ — наименьшая толщина проката ЭТС. Расчеты, проведенные по полученным формулам для многих вариантов дросселей фильтров при $b_{c\min} = 0,08$ мм, дают границу верхнего значения частоты пульсаций $f_{\max}$. Она составляет 100 кГц. При большей частоте целесообразно использовать магнитопроводы из аморфных сталей или магнитодиэлектриков, а при частоте пульсаций свыше 250 кГц — ферриты.

Для заданной толщины листа b_c потери от вихревых токов P_v могут быть оценены по формуле, вытекающей из выражений (31) и (34) при замене $U_{др}$ на $U_{x,x}$:

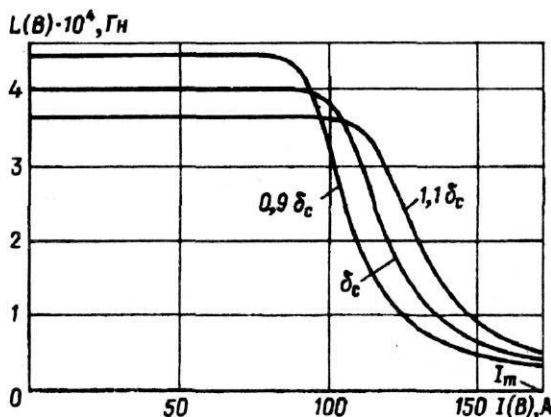


Рис. 4. Регулировочные характеристики дросселя

$$P_a \leq \frac{(U_{x,x} b_c)^2}{12 \rho_c L_{\min} (\alpha_c \beta_c \text{ch}(\beta_c B_m) + \kappa_c + \frac{k_c \delta_c}{k_a \mu_0 l_c})} \quad (37)$$

Для тепловых расчетов необходимо знать среднюю мощность потерь в обмотке, которая может быть найдена из выражения

$$P_{o, \text{cp}} = \frac{P_o \cdot \text{ПН}}{100} \quad (38)$$

Массы магнитопровода, активного материала обмотки и активных материалов дросселя определяются соответственно по формулам:

$$M_c = \gamma_c S_c l_c; M_o = \gamma_o S_{\text{пр}} l_{\text{ср.н}} W; M_{\text{др}} = M_c + M_o, \quad (39)$$

где γ_c и γ_o — соответственно плотность материалов магнитопровода и обмотки.

Расчеты можно провести для ряда приемлемых магнитопроводов, при этом сравнивают их массу и стоимость, а затем выбирают наиболее оптимальный вариант.

По разработанной методике были рассчитаны и изготовлены дроссели, которые применены в инверторных источниках питания, изготовленных в НПО «Ритм» (завод «Реле и автоматика») г. Киев, на заводе «Коммунар» (г. Харьков) и в концерне «Chowel» (Южная Корея). При этом получено практически полное совпадение расчетных данных с экспериментальными.

Пример. Рассмотрим дроссель выходного фильтра со следующими параметрами: $L_{\max} = 400 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; $L_{\min} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; $I_n = 160 \text{ А}$; $I_m = 172,5 \text{ А}$; частота пульсаций тока в дросселе $f = 11 \text{ кГц}$; напряжение холостого хода инверторного источника питания $U_{x,x} = 50 \text{ В}$; ПН = 60 %. Магнитопровод дросселя типа ПП с $a = 40 \text{ мм}$, $b = 20 \text{ мм}$, $h_{\text{ок}} = 60 \text{ мм}$, $l_{\text{ок}} = 32 \text{ мм}$ и $k_c = 0,94$, выполнен из ЭТС марки 3413 толщиной 0,35 мм (см. табл. 1).

Расчеты, выполненные по предложенной методике, дают следующие результаты. Выбранный стандартный магнитопровод подходит, так как его объем $V_c = 185,6 \text{ см}^3$ лежит в интервале между $V_{c \max} = 0,1178 \text{ м}^3$ и $V_{c \min} = 1,88 \text{ см}^3$. Значение воздушного зазора $\delta_c = 3,185 \text{ мм}$; активное сопротивление $R_o = 0,00262 \text{ Ом}$; потери в дросселе $P_o = 67 \text{ Вт}$; $P_{\text{ср}} = 40,3 \text{ Вт}$; $P_a = 3,85 \text{ Вт}$. Масса активных ма-

териалов дросселя составляет: $M_c = 1,42 \text{ кг}$; $M_o = 0,898 \text{ кг}$; $M_{\text{др}} = 2,318 \text{ кг}$.

Значение $k_p = P_a/P_o = 0,057$; при этом толщина ленты $b_c = 0,35 \text{ мм}$ взята с большим запасом. Поэтому при $f = 11 \text{ кГц}$ можно взять большую толщину ленты, например 0,5 мм.

По формулам (34), дающим параметрическую зависимость между током $I(B)$ и индуктивностью $L(B)$, построена регулировочная характеристика дросселя при δ_c приведенная на рис. 4. На этом же рисунке имеются кривые отклонения воздушного зазора δ_c на $\pm 10\%$ от расчетного значения. Графики на рис. 3 также построены для данного примера.

Выводы

1. Разработанная методика расчета дросселей входного и выходного фильтров сварочных инверторных источников питания позволяет при использовании стандартных магнитопроводов обеспечить требуемые максимальную и минимальную индуктивности дросселя соответственно при наименьшем и номинальном уровнях значений сварочного тока, и позволяет выбирать толщину ленты электротехнической стали магнитопровода в зависимости от частоты пульсаций тока. Магнитопроводы с толщиной ленты 0,08 мм можно применять в дросселях фильтров при частоте пульсаций токов до 100 кГц.

2. Использование контролируемого насыщения дросселя при больших токах позволяет существенно уменьшить массу дросселя без ухудшения его хороших фильтрующих свойств.

1. Управляемые полупроводниковые вентили / Ф. Джентри, Ф. Гутцвиллер, Н. Голоньяк, Э. фон Застров. — М.: Мир, 1967. — 456 с.
2. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов. — М.: Энергия, 1969. — 279 с.
3. Лабунцов В. А., Ривкин Г. А., Шевченко Г. И. Автономные тиристорные инверторы. — М.: Энергия, 1976. — 159 с.
4. Пентегов И. В. Оптимизация защитных RLC-цепей инверторных источников питания для дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1987. — № 5. — С. 29–36.
5. Инверторный источник тока для дуговой сварки / В. С. Смирнов, М. И. Закс, П. А. Кошелев, С. А. Ермолин // Свароч. пр-во. — 1983. — № 11. — С. 35–36.
6. Пентегов И. В., Сидорев В. Н. Оценка интенсивности звучания электрической сварочной дуги // Автомат. сварка. — 1992. — № 11–12. — С. 28–31.
7. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. — М.: Энергия, 1968. — 504 с.
8. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. — М.: Энергия, 1975. — 749 с.
9. Пентегов И. В., Рымар С. В. Метод расчета тока холостого хода трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Техн. электродинамика. — 1996. — № 1. — С. 39–45.
10. Пентегов И. В., Рымар С. В. Метод определения потерь в стали трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Там же. — 1995. — № 6. — С. 35–40.
11. Пентегов И. В., Волков И. В. Оптимизация зарядного процесса индуктивных накопителей энергии // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1969. — № 1. — С. 163–167.

Поступила в редакцию 02.09.96,
в окончательном варианте 23.10.96