

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СИЛОВОГО ДРОССЕЛЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Ковалев Е.Б., Шавёлкин А.А., Мирошник Д.Н.

Донецкий национальный технический университет

sha@dgtu.donetsk.ua

In work is presented the design procedure of power losses of the power choke, which is a part DC-DC converter. The given technique considers changes of losses in steel and losses in copper at work of a magnetic element on the raised non-standard frequency (up to 10 kHz). Besides in work is described the technique of designing of the choke, made from a condition of reception a minimum of losses.

В последнее время импульсные преобразователи постоянного напряжения находят широкое применение в электроприводах постоянного тока и, как промежуточные преобразователи – в электроприводах переменного тока. Эффективность применения подобных преобразователей во многом зависит от характеристик дросселя, который входит в состав преобразователя. Это в первую очередь касается габаритов и КПД. При этом существует ряд особенностей, которые необходимо учитывать. Это и сравнительно высокая рабочая частота (обычно до 10 кГц), и большие токи – до нескольких сотен ампер.

Обзор существующих решений. В настоящее время наиболее полно изученными считаются вопросы проектирования дросселей малой мощности (до нескольких киловольт-ампер) [1, 2], работающих на высоких частотах, однако продолжающиеся исследования показывают [3], что даже в этом диапазоне мощностей приходится корректировать результаты и положения не вызывавшие ранее сомнений.

Цель работы: разработать методику расчета и проектирования силовых дросселей постоянного тока, работающих на частотах 1-10 кГц исходя из минимума потерь энергии в нем.

Дроссель работает на постоянном токе, причем ток пульсирует с достаточно высокой частотой – несколько кГц. Наличие пульсаций тока обуславливает значительные потери энергии в дросселе, которые включают в себя:

- потери в сердечнике (магнитопроводе): потери на гистерезис, вызванные циклическим перемагничиванием и потери на вихревые токи;
- потери в обмотке: потери в меди на постоянном токе и потери в меди на переменном токе (потери, вызванные поверхностным эффектом или эффектом вытеснения тока, и потери, вызванные эффектом близости).

Потери в стали на перемагничивание определяются по формуле [3]:

$$P_{cm(гис)} = f_k S_m l_m \int_0^{T_k} H dB, \quad (1)$$

где $f_k = 1/T_k$ – частота коммутации импульсного преобразователя; S_m, l_m – геометрические размеры магнитопровода: площадь поперечного сечения и средняя длина; $\int_0^{T_k} H dB$ – площадь используемой части петли гистерезиса (рис.1).

Формула (1) описывается более простым выражением [1]:

$$P_{cm(гис)} = K_H f_k B^{\alpha}_{max}, \quad (2)$$

где K_H, α – эмпирические коэффициенты определяются экспериментально ($\alpha=2$ [4]), при этом α – выбирается с допущением синусоидального распределения магнитной индукции; B_{max} – максимальное значение магнитной индукции в сердечнике.

Потери на вихревые токи определяются в соответствии с уравнением Чарльза Штейнмеца [3]:

$$P_{cm(вих)} = K_e f^2_k B^2_{max}. \quad (3)$$

В то же время, общие потери в стали определяются в соответствии с [5, 6, 7]:

$$P_{cm(наст)} = P_{cm(гис)} m, \quad (4)$$

где $P_{cm(гис)}$ – удельные потери в стали (зависят от материала, из которого собран сердечник); $m = K_{cm} V \gamma_{cm}$ – масса сердечника;

из которого собран сердечник); $m = K_{cm} V \gamma_{cm}$ – масса сердечника; $K_{cm} = 0.85-1$ – коэффициент заполнения сталью (зависит от толщины листа стали); V – объем магнитопровода после прессовки; γ_{cm} – плотность стали.

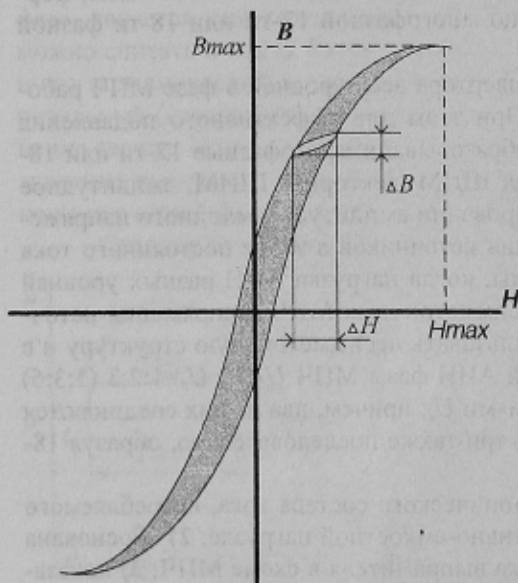


Рисунок 1 - Общая и частная петли гистерезиса

Из (4) видно, что паспортные потери в стали однозначно зависят от материала, его толщины, и, собственно, объема магнитопровода.

Для определения потерь в дросселе, работающего с подмагничиванием на высокой частоте, достаточно оценить потери от протекания тока высокой частоты через него. С этой целью введем величины относительного изменения вихревых потерь $\xi_{вих}$ и потерь на гистерезис $\xi_{гис}$ в магнитном устройстве, используя выражения (2,3):

$$\xi_{вих} = \frac{f_{пасн}^2 B_{max(пасн)}^2}{f_k^2 (\Delta B/2)^2}, \quad (5)$$

$$\xi_{гис} = \frac{f_{пасн} B_{max(пасн)}^2}{f_k (\Delta B/2)^2}, \quad (6)$$

где $f_{пасн}$ – паспортная частота, на которую рассчитана сталь; $B_{max(пасн)}$ – паспортная максимальная индукция в сердечнике; $f_k = 1/T_k$ – частота коммутации импульсного преобразователя; $\Delta B/2$ – амплитуда изменения магнитной индукции, обусловленная колебаниями напряженности магнитного поля $\Delta H/2$, которые в свою очередь вызваны колебаниями тока дросселя $\Delta I/2$ (рис.1).

Из выражений (5), (6) общие потери в стали дросселя определяются косвенным путем, используя паспортные и текущие значения индукций и частот, при которых данный магнитный элемент работает:

$$P_{ст} = \frac{P_{вих(пасн)}}{\xi_{вих}} + \frac{P_{гис(пасн)}}{\xi_{гис}} \rightarrow \frac{P_{ст(пасн)}}{\xi_{вих}}. \quad (7)$$

Ввиду того, что величина $\xi_{гис} \gg \xi_{вих}$, потери в стали дросселя окажутся не больше значения $P_{ст(пасн)}/\xi_{вих}$ (7) и уменьшение потерь можно достичь при выборе стального сердечника с маленькими удельными потерями (толщина стали менее 0.2 мм), с индукцией насыщения $B_{max} \geq 1.5$. Дальнейшее уменьшение потерь в стали сердечника дросселя возможно при условии уменьшения объема магнитопровода.

Таким образом, индуктивность импульсного преобразователя выбирают исходя из соображений увеличения $\xi_{вих}$, когда, либо при заданной f_k достаточно мала $\Delta B/2$, либо при заданных $\Delta B/2$ достаточно мала f_k , в зависимости от алгоритма управления импульсным преобразователем [8]. Последнее обстоятельство возможно при увеличении индуктивности дросселя, что неизбежно приводит к увеличению его габаритов. Следовательно, необходимо определить методику расчета геометрических параметров дросселя с целью уменьшения его размеров и, соответственно, потерь мощности.

Основные геометрические параметры дросселя определяются из двух условий: для сердечника и для катушки [4]:

$$\Psi_{max} = WB_{max} S_m K_{cm} \cdot \frac{I_{max}}{j} = \frac{S_{ок} K_{ок}}{W}, \quad (8)$$

где $S_{ок}$ – площадь окна сердечника; $K_{ок} = 0.15-0.5$ – коэффициент заполнения катушкой окна сердечника [4]; W – количество витков обмотки дросселя; I_{max} – максимальное значение тока дросселя; j – плотность тока [9]; Ψ_{max} – амплитуда потокосцепления;

Из (8) видно, что $S_{ок}$, S_m зависят от числа витков катушки W , что требует рационального определения последней величины, в частности как зависит V от W . С целью определения объема сердечника, выражения (8) дополняются уравнениями, которые характеризуют его с точки зрения геометрии и точки зрения физических процессов, протекающих в нем (магнитопровод неразветвленный однородный):

$$\begin{cases} S_m = \frac{I_{max} L}{B_{max} W K_{cm}} \\ l_{cm} = \frac{W a_{сш} K_{30}}{K_w N_{сш}} \\ S_{ок} = \frac{b_{сш} a_{сш} W K_{20}^2}{K_{ок}} \\ l_{г} = \frac{\mu_0 I_{max} W}{B_{max}} \\ v = \sqrt{\frac{S_m}{K_h K_{cm}}} \\ z = K_h v K_{cm} \\ l_{я} = \frac{S_{ок}}{l_{cm}} + 2v \end{cases} \quad (9)$$

где L – заданное значение индуктивности дросселя; $b_{свз}$, $a_{свз}$ – соответственно меньший и больший геометрические размеры сечения обмоточного провода с учетом изоляции (выбирается, используя плотность тока [9]); $K_{з0}$ – коэффициент заполнения обмоткой обмоточного пространства вдоль стержня и ярма; $0 < K_{н1} \leq 2$ – число катушек дросселя; $N_{сч}$ – число слоев, намотанных на каждую катушку; l_0 – длина воздушного (немагнитного) зазора, определяется из условия пренебрежения магнитным сопротивлением сердечника; $l_{я}$, $l_{ст}$ – длина соответственно ярма и стержня магнитной части дросселя (определяется без учета l_0); v , z – соответственно толщина и высота сердечника (рис.2); K_h – соотношение между толщиной и высотой сердечника.

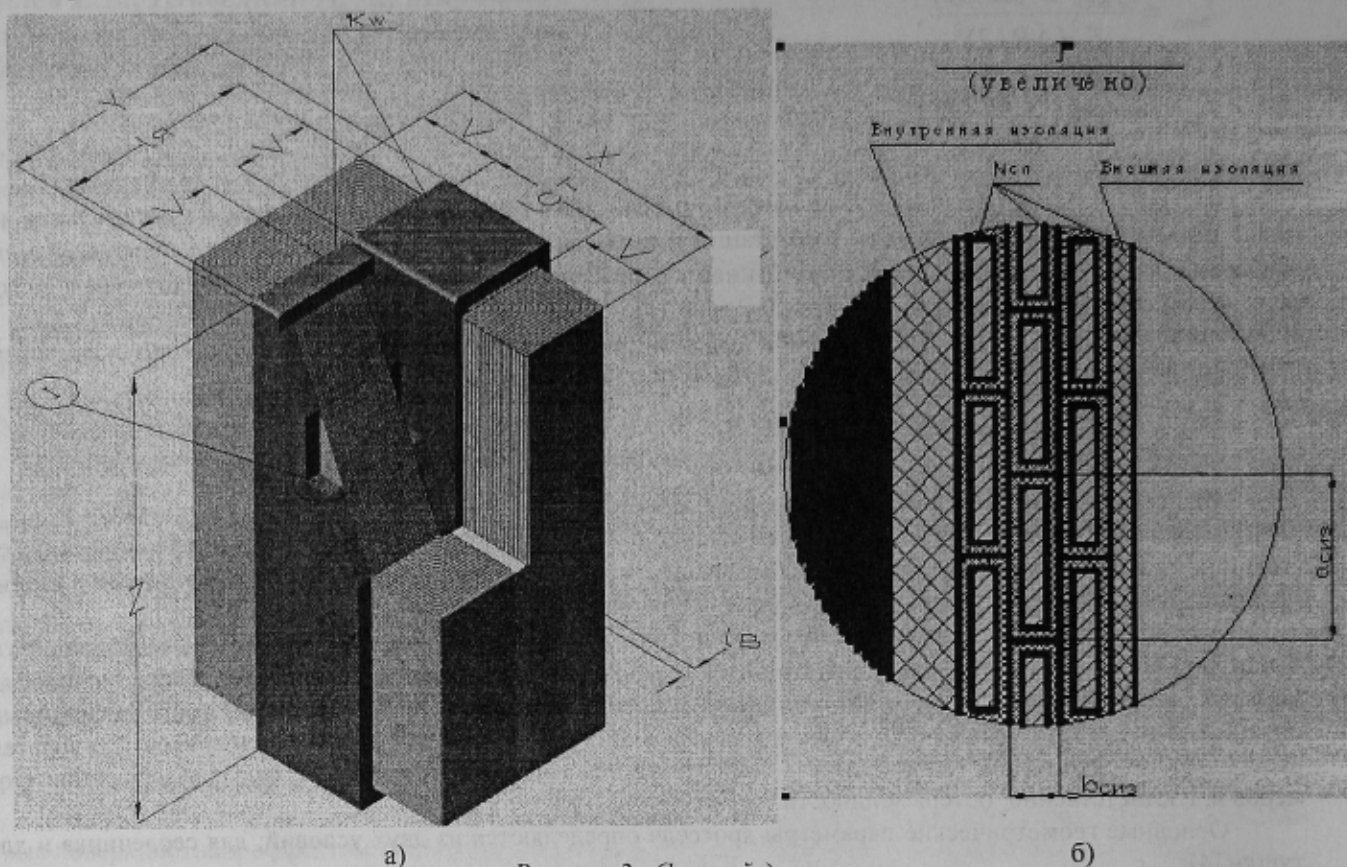


Рисунок 2 – Силовой дроссель:
а) трехмерное изображение дросселя; б) сечение обмотки дросселя;

Из выражений (9) определяется объем сердечника, величина которого непосредственно влияет на значение потерь в стали (4):

$$V = \frac{2I_{max}L}{B_{max}WK_{ст}} \left[\frac{Wa_{свз}K_{з0}}{K_w N_{сч}} + \frac{2}{K_{ст}} \sqrt{\frac{2I_{max}L}{B_{max}WK_h} + \frac{K_w N_{сч} b_{свз}}{K_{ок}}} \right] \quad (10)$$

Как показано на рис.3 уменьшение объема, массы и потерь в стали возможно за счет увеличения количества витков W и увеличения коэффициента соотношения между толщиной и высотой сердечника K_h . При этом, количество витков непосредственно влияет на величину немагнитного зазора l_0 (9), значение которого не должно искажать свойств магнитной системы.

Рациональный выбор количества витков обмотки дросселя невозможно осуществить без учета потерь в меди дросселя, которые состоят из двух составляющих: потери на постоянном токе и потери на переменном токе. Потери в меди на постоянном токе:

$$P_{м(DC)} = I_{DC}^2 R_{DC}, \quad (11)$$

где I_{DC} – постоянная составляющая тока, текущего через дроссель; $R_{DC} = \rho l_{пр} / S_{пр}$ – сопротивление провода в обмотке дросселя постоянному току; $l_{пр} = CДВ * W$ – длина обмоточного провода ($CДВ$ – средняя длина витка).

Потери в меди на переменном токе с учетом эффектов вытеснения тока и близости [3]:

$$P_{м(AC)} = I_{AC}^2 R_{DC} \sigma \left[G_1(\sigma) + \frac{2}{3} (N_{сч}^2 - 1) (G_1(\sigma) - 2G_2(\sigma)) \right], \quad (12)$$

где $G_1(\sigma) = \frac{\sinh(2\sigma) + \sin(2\sigma)}{\cosh(2\sigma) - \cos(2\sigma)}$, $G_2(\sigma) = \frac{\sinh(\sigma)\cos(\sigma) + \cosh(\sigma)\sin(\sigma)}{\cosh(2\sigma) - \cos(2\sigma)}$ – функции распределения

МДС вокруг слоев обмотки дросселя. $\sigma = b/\delta$ – коэффициент увеличения R_{DC} (b – высота сечения провода обмот-

ки дросселя без изоляции); I_{ac} – переменная составляющая тока, текущего через дроссель; $\delta = \frac{0.075}{\sqrt{f_k}} \cdot [M]$ – глубина поверхностного слоя для меди.

При проектировании дросселя желательно укладывать обмотку в один слой с тем, чтобы исключить эффект близости проводников. Выражение (12) при этом значительно упрощается ($N^2_{cv} - 1 = 0$), и, соответственно, уменьшаются потери в меди на переменном токе. Для исключения эффекта вытеснения тока обмотку подбирают таким образом, чтобы $b < \delta$ (литцендрат [3], винтовая обмотка [9]). В этом случае увеличения сопротивления обмоточного провода R_{oc} на переменном токе не произойдет. Кроме того, уменьшения потерь в меди можно достичь за счет уменьшения плотности тока и, соответственно, увеличения площади сечения проводника.

На рисунке 4 представлены зависимости, построенные по выражениям (4-7, 9-12), которые показывают, как зависят суммарные потери дросселя P_{Σ} от числа витков W и коэффициента K_h . Из рисунка 4 видно, что при проектировании силового дросселя рационально выбирать W таким образом, чтобы потери попали в зону $P_{\Sigma} = \min$ (рис. 4).

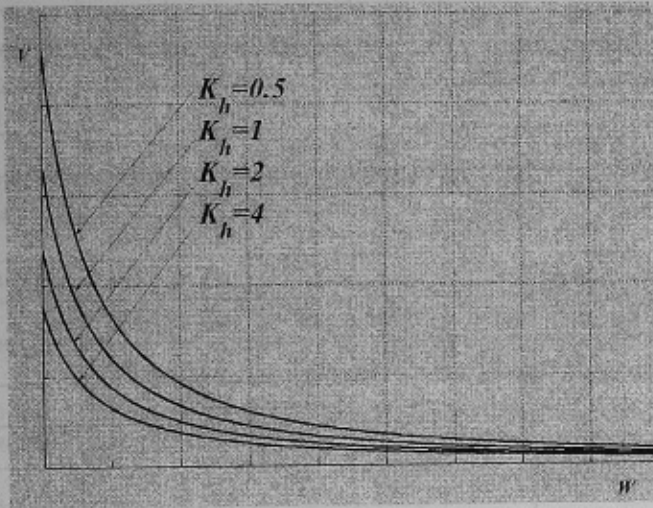


Рисунок 3 – Зависимость объема сердечника V от количества витков W и коэффициента K_h

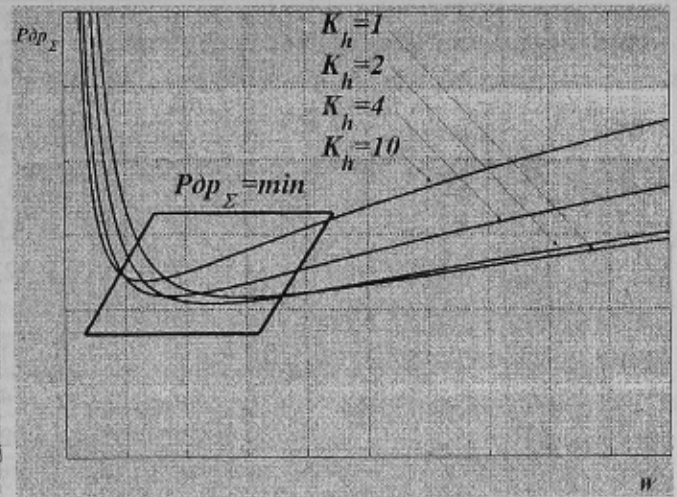


Рисунок 4 – Зависимость суммарных потерь дросселя от W и коэффициента K_h

Проверка спроектированного дросселя осуществляется, используя ограничение по нагреву. Это ограничение заключается в нахождении температуры перегрева изоляции обмотки над температурой окружающей среды, и в сравнении ее значения для конкретного типа изоляции с паспортным. Это условие определяется для установившегося температурного режима работы дросселя, и зависит не только от потерь в стали дросселя $P_{ст}$, но и от его потерь в меди P_m :

$$\tau = \frac{P_{ст}}{\lambda S_{охл}} + \frac{P_m}{\lambda S_{обм}} \quad (13)$$

где $S_{охл} = \frac{8I_{max}L}{B_{max}WK_{cm}K_h}(1+K_h) + \frac{4}{K_{cm}} \sqrt{\frac{I_{max}L}{B_{max}WK_h}(1+K_h)} \cdot \left[\frac{Wa_{cv3}K_{zo}}{K_w N_{ст}} + \frac{b_{cv3}K_{zo}K_w N_{ст}}{K_{ок}} \right]$ – общая площадь поверхности охлаждения сердечника; λ – коэффициент теплообмена (для изоляции класса А $\lambda = 12[4]$);

$$S_{обм} = 2 \frac{Wa_{cv3}K_{zo}}{N_{ст}K_{cm}} \sqrt{\frac{I_{max}L}{B_{max}WK_h}(1+K_h)}$$

– площадь поверхности охлаждения обмотки.

Согласно выражению (13) температура перегрева изоляции τ не должна превышать заданного паспортного значения $\tau_{доп}$, в противном случае необходимо увеличивать класс изоляции.

Расчет дросселя производился для асинхронного привода применительно рудничного электровоза АМ-8 с аккумуляторной батареей на напряжение 130 В при мощности потребляемой двигателем 13 кВт [8]. Результаты проектирования дросселя с параметрами: $I_{max} = 220$ А, $I_{ном} = 110$ А, $L = 2.5$ мГн, $f_k = 3200$ Гц, $\Delta l / 2 = 5$ А, $K_{ок} = 0.5$, $K_{zo} = 1.05$ – сведены в таблицу 1.

Число витков W в каждом конкретном случае выбиралось из условия минимизации потерь дросселя и укладывалось во всех случаях в один слой. Параметры обмоточного провода выбирались согласно [9, с.215, с.257], при плотности тока $j = 2.8$: $S_{np} = 39.2$ мм², $a = 12.5$ мм, $b = 3.55$ мм, $b_{cv3} = 13$ мм, $a_{cv3} = 4.05$ мм.

Из таблицы видно, что наиболее выгодным материалом для сердечника является стальная электротехническая холоднокатаная анизотропная лента, которая к тому же рассчитана на $f_{расч} = 400$ Гц. Последнее обстоятельство позволяет спроектировать дроссель с достаточно малыми суммарными потерями в номинальном режиме ($\cong 100$ Вт), которые к тому же несколько завышены (7). При этом, дроссель с сердечником из электротехнической стали также может быть конкурентоспособен в сравнении со стальной лентой. Несмотря на большие

потери (≥ 200 Вт), дальнейшее их уменьшение возможно за счет укладывания обмотки в несколько слоев. В этом случае длина стержня сердечника будет уменьшаться, а значит, будет уменьшаться объем, масса и потери в стали дросселя. При этом будут увеличиваться потери в меди, что потребует от проектировщика учета потерь вызванных эффектом близости проводников обмотки дросселя.

Таблица 1 – Результаты проектирования силового дросселя, работающего на частоте 3.2 кГц

марка стали	B_{max} , Тл	P_{cm} , Вт/кг	K_b	K_{ν}	W	l_{os} , мм	m, кг	x, мм	y, мм	z, мм	P_{cm} , Вт	P_m , Вт	$P_{dp\Sigma}$, Вт	τ , °C
лента 3422 $K_{cm}=0.88$, 0.08мм, 400Гц $\gamma_{cm}=7650$ кг/м ³	1.5	19	2	1	27	5	112	184	544	165	71	66	137	40
				2	27	5	76	193	360	165	48	66	114	40
			5	1	19	3.5	116	141	392	311	73	69	141	39
				2	19	3.5	80	150	162	311	50	69	119	39
лента 3424 $K_{cm}=0.88$, 0.08мм, 400Гц $\gamma_{cm}=7650$ кг/м ³	1.5	16	2	1	25	4.6	117	191	524	171	62	64	126	38
				2	25	4.6	81	200	353	171	43	64	106	38
			5	1	18	3.3	119	145	381	319	63	67	130	37
				2	18	3.3	83	153	259	319	44	67	111	37
лента 3425 $K_{cm}=0.88$, 0.08мм, 400Гц $\gamma_{cm}=7650$ кг/м ³	1.5	15	2	1	24	4.4	119	195	514	175	59	62	122	38
				2	24	4.4	83	203	350	175	41	62	103	38
			5	1	17	3.1	123	149	372	328	61	65	126	37
				2	17	3.1	87	157	256	328	43	65	108	37
сталь изотр. 3414 $K_{cm}=0.96$, 0.3мм, 50Гц $\gamma_{cm}=7650$ кг/м ³	1.5	1.03	2	1	50	9.2	91	132	806	121	199	89	288	57
				2	50	9.2	54	141	465	121	117	89	206	57
			5	1	36	6.6	92	101	583	226	200	95	295	55
				2	36	6.6	55	109	338	226	120	95	215	55
сталь изотр. 3415 $K_{cm}=0.96$, 0.3мм, 50Гц $\gamma_{cm}=7650$ кг/м ³	1.5	0.97	2	1	49	9	92	133	794	122	188	88	276	56
				2	49	9	54	142	460	122	111	88	200	56
			5	1	35	6.5	93	102	571	229	190	94	284	54
				2	35	6.5	56	110	332	229	114	94	208	54
сталь изотр. 2413 $K_{cm}=0.97$, 0.35мм, 50Гц $\gamma_{cm}=7650$ кг/м ³	1.5	2.5	2	1	79	14.6	84	106	1176	96	444	112	557	83
				2	79	14.6	46	115	637	96	245	112	357	83
			5	1	56	10.3	85	82	834	181	448	119	567	80
				2	56	10.3	47	91	456	181	250	119	369	80
сталь изотр. 2421 $K_{cm}=0.95$, 0.28мм, 400Гц $\gamma_{cm}=7650$ кг/м ³	1.0	19.5	2	1	34	9.4	161	193	649	180	104	90	194	41
				2	34	9.4	106	202	417	180	68	90	158	41
			5	1	24	6.6	165	147	466	339	107	94	201	40
				2	24	6.6	111	156	303	339	71	94	166	40

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальян Р.Х., Обрусник В.П. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. - Томск: Издательство Том. ун-та, 1987. -168 с.
2. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. М.: Советское радио, 1971. - 720 с.
3. Erickson, Robert W., and Dragan Maksimovic. Fundamentals of Power Electronics, 2001. Ch.13@14, pp. 491-562.
4. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Морозов В.Г. Перетворювальна техніка. Частина 1. – К.:ICDO, 1996.
5. Сталь электротехническая холоднокат. изотр. тонколистовая, технические условия, ГОСТ 21427.1–83.
6. Сталь электротехническая холоднокат. изотр., технические условия, ГОСТ 21427.2 – 83.
7. Лента стальная электротехническая холоднокат. изотр., технические условия, ГОСТ 21427.4 – 78.
8. Шавёлкин А.А., Мирошник Д.Н. Преобразователь частоты с промежуточным звеном повышенного напряжения при питании от аккумуляторной батареи // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка та Енергетика», випуск 67, Донецьк: ДонНТУ, 2003. – 204 с.
9. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб.пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

Рекомендовано проф., д.т.н. Карась С.В.