

РАСЧЕТ ДРОССЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКОЙ

Н. П. ВАСИЛЬЕВА, О. А. СЕДЫХ

(Москва)

Предлагается метод расчета дроссельных магнитных усилителей, позволяющий определить все параметры усилителя при минимальных габаритах или весе усилителя.

Исходными данными при расчете являются максимальная мощность и $\cos \varphi$ нагрузки, кратность тока и коэффициент усиления при максимальном сигнале.

Приводятся кривые удельных объемов стали усилителей в зависимости от напряженности максимального подмагничивающего поля.

Известные нам методы расчета [1—6] не позволяют при заданной максимальной мощности нагрузки простым способом определить минимально возможный объем стали усилителя, а также минимальный объем или вес всего усилителя в целом.

Настоящая работа посвящена созданию метода расчета дроссельных магнитных усилителей, целью которого является определение всех параметров усилителя при минимальных весе, или габаритах, или стоимости усилителя.

Исходными данными при расчете является максимальная мощность и $\cos \varphi$ нагрузки, кратность тока нагрузки и коэффициент усиления при максимальном сигнале.

Расчет ведется по двум крайним режимам работы магнитного усилителя: при отсутствии сигнала и при максимальном сигнале.

Предполагается, что при этих режимах работы токи и напряжения в усилителе близки к синусоидальным. Это — основное допущение данного метода расчета. Однако для крайних режимов работы магнитного усилителя такое допущение может быть сделано с гораздо большим правом, чем для промежуточных (как, например, при применении эллипса нагрузки [6] для расчета характеристик магнитного усилителя).

Вторым допущением, принятым в работе, является пренебрежение потерями в усилителе.

При выводе расчетных выражений введем следующие обозначения: U_{\sim} — напряжение питания (в), $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}} + jX_{\text{н}}$ — полное сопротивление нагрузки (ом), $P_{\text{i}} = I^2 Z_{\text{н}}$ — максимальная кажущаяся мощность нагрузки (ва); при отсутствии подмагничивания B_0 — индукция в сердечнике дросселя (гс) (амплитудные значения), H_0 — напряженность поля (а/см) (амплитудные значения), I_0 — ток (а) (действующие значения), U_0 — напряжение на обмотках дросселя (в) (действующие значения); при максимальном подмагничивающем сигнале $B_{\text{к}}$ — индукция в сердечнике (гс) (амплитудные значения), $H_{\text{к}}$ — напряженность поля (а/см) (амплитудные значения), $I_{\text{к}}$ — ток (а) (действующие значения), $U_{\text{к}}$ — напряжение на обмотках дросселя (в) (действующие значения);

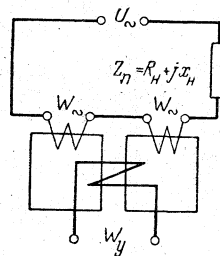


Рис. 1

$k = I_{\text{к}} / I_0$ — кратность тока в нагрузке, W_{\sim} — число витков обмотки переменного тока каждого дросселя, $S_{\text{ст}}$ — площадь сечения стали сердечника (см^2), $l_{\text{ст}}$ — средняя длина магнитопровода (см), S_0 — площадь сечения окна сердечника (см^2), l_w — средняя длина одного витка обмотки (см), $W_{\text{у}}$ — число витков обмотки управления.

Расчет ведется для схемы последовательного включения обмоток W_{\sim} дросселя (рис. 1).

1. Определение объема стали

Для синусоидально изменяющихся напряжений и токов схемы рис. 1 можно написать следующие уравнения:

а) при отсутствии сигнала

$$U_{\sim}^2 = (U_0 + I_0 X_{\text{н}})^2 + I_0^2 R_{\text{н}}^2, \quad (1)$$

б) при максимальном сигнале

$$U_{\sim}^2 = (U_{\text{к}} + I_{\text{к}} X_{\text{н}})^2 + I_{\text{к}}^2 R_{\text{н}}^2. \quad (2)$$

Активным сопротивлением обмоток дросселя пока пренебрегаем. Учтем, что $I_{\text{к}} = I_0 k$, и приравняем уравнения (1) и (2), тогда

$$U_0^2 - U_{\text{к}}^2 + 2X_{\text{н}} I_{\text{к}} \left(\frac{U_0}{k} - U_{\text{к}} \right) + I_{\text{к}}^2 (X_{\text{н}}^2 + R_{\text{н}}^2) \left(\frac{1}{k^2} - 1 \right) = 0. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что

$$U = 4,44 f 2W_{\sim} S_{\text{ст}} B 10^{-8},$$

преобразуем выражение (3) к следующему виду:

$$S_{\text{ст}}^2 + \frac{2I_{\text{к}} X_{\text{н}} \left(\frac{B_0}{k} - B_{\text{к}} \right)}{8,88 f W_{\sim} (B_0^2 - B_{\text{к}}^2) 10^{-8}} S_{\text{ст}} + \frac{I_{\text{к}}^2 (X_{\text{н}}^2 + R_{\text{н}}^2) \left(\frac{1}{k^2} - 1 \right)}{(8,88 f W_{\sim} 10^{-8})^2 (B_0^2 - B_{\text{к}}^2)} = 0. \quad (4)$$

Это уравнение позволяет определить сечение сердечника дросселя:

$$S_{\text{ст}} = \frac{I_{\text{к}} X_{\text{н}} \left(B_{\text{к}} - \frac{B_0}{k} \right) \pm I_{\text{к}} \sqrt{X_{\text{н}}^2 \left(\frac{B_0}{k} - B_{\text{к}} \right)^2 + Z_{\text{н}}^2 \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) (B_0^2 - B_{\text{к}}^2)}}{8,88 f W_{\sim} (B_0^2 - B_{\text{к}}^2) 10^{-8}}. \quad (5)$$

Знак (—) перед корнем в дальнейшем отбрасывается, так как $S_{\text{ст}}$ не может быть меньше нуля.

Найдем из уравнения $H_{\text{к}} l_{\text{ст}} = \sqrt{2} I_{\text{к}} W_{\sim}$ значение $l_{\text{ст}}$ и умножим на него уравнение (5). Таким образом мы определим объем стали одного сердечника дросселя $V_{\text{ст}} = S_{\text{ст}} l_{\text{ст}}$:

$$V_{\text{ст}} = \frac{\sqrt{2} I_{\text{к}}^2 \left[X_{\text{н}} \left(B_{\text{к}} - \frac{B_0}{k} \right) + \sqrt{X_{\text{н}}^2 \left(B_{\text{к}} - \frac{B_0}{k} \right)^2 + Z_{\text{н}}^2 \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) (B_0^2 - B_{\text{к}}^2)} \right]}{8,88 f H_{\text{к}} (B_0^2 - B_{\text{к}}^2) 10^{-8}}.$$

Учитывая, что $I^2 Z_{\text{н}} = P_i$ — кажущаяся мощность нагрузки и $X_{\text{н}} / Z_{\text{н}} = \sin \varphi$, получим окончательно

$$V_{\text{ст}} = \frac{1,6 \times 10^7 P_i \left[\sin \varphi \left(B_{\text{к}} - \frac{B_0}{k} \right) + \sqrt{\left(B_{\text{к}} - \frac{B_0}{k} \right)^2 \sin^2 \varphi + \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) (B_0^2 - B_{\text{к}}^2)} \right]}{f H_{\text{к}} (B_0^2 - B_{\text{к}}^2)}. \quad (6)$$

Если нагрузка чисто активная, то выражение (6) значительно упрощается:

$$V_{ст} = \frac{1,6 \times 10^7 P \sqrt{1 - \frac{1}{k^2}}}{f H_K \sqrt{B_0^2 - B_K^2}}. \quad (7)$$

Для чисто индуктивной нагрузки

$$V_{ст} = \frac{1,6 \times 10^7 P_i \left(1 - \frac{1}{k}\right)}{f H_K (B_0 - B_K)}.$$

Выражения (6) и (7) при значениях $k \gg 1$ могут быть несколько упрощены, так как членом $\frac{1}{k^2}$ по сравнению с единицей можно пренебречь.

Тогда для комплексной нагрузки при $k \gg 1$ получим

$$V_{ст} = \frac{1,6 \times 10^7 P_i \left[\sin \varphi \left(B_K - \frac{B_0}{k} \right) + \sqrt{\sin^2 \varphi \left(B_K - \frac{B_0}{k} \right)^2 + (B_0^2 - B_K^2)} \right]}{f H_K (B_0^2 - B_K^2)}, \quad (6')$$

и соответственно для активной нагрузки

$$V_{ст} = \frac{1,6 \times 10^7 P}{f H_K \sqrt{B_0^2 - B_K^2}}. \quad (7')$$

Уже при $k = 4$ погрешность от пренебрежения членом $\frac{1}{k^2}$ не превышает 3%.

Выражения (6) и (7) показывают, что объем стали сердечников прямо пропорционален мощности нагрузки, обратно пропорционален частоте питания и обратно пропорционален напряженности переменного поля, но зависит при этом от соотношений B_K и B_0 , определяющихся выбранной напряженностью переменного поля и необходимой кратностью изменения тока нагрузки.

Как будет показано ниже, вопрос выбора оптимальных параметров магнитного усилителя тесно связан с выбором напряженностей переменного и постоянного полей.

Объем стали сердечников может быть определен по формулам (6) или (7) при помощи семейства характеристик материала сердечников $B_{\sim} = \varphi(H_{\sim}, H_y)$ (рис. 2). Расчет объема стали ведется по двум кривым семейства характеристик материала: по основной кривой намагничивания при $H_y = 0$ и по кривой $B_{\sim} = \varphi(H_{\sim}, H_{y \max})$ при $H_y = H_{y \max}$. Задаваясь рабочей точкой на кривой $B_{\sim} = \varphi(H_{\sim}, H_{y \max})$ (например, точкой А на рис. 2, где $H_{y \max} = 4$ а/см), определяем для этой точки H_K и B_K , затем определяем H_0 , равное H_K/k , и по основной кривой намагничивания находим соответствующее значение B_0 . Определив H_K , B_K и B_0 , находим по формуле (6) или (7) объем стали сердечника. Делая такие же построения для нескольких других точек на кривой $B_{\sim} = \varphi(H_{\sim}, H_{y \max})$, строим график зависимости объема стали сердечника от величин B_0 (или H_K , или H_0 , так как они взаимосвязаны). Эта графически полученная зависимость объема стали имеет явно выраженный минимум при некотором значении B_0 (H_0 и H_K).

Графики зависимости удельного объема стали $V_{ст}/P_i = F_1(B_0)$ [или $F_2(H_0)$, или $F_3(H_K)$] при $H_y = \text{const}$ могут быть построены для различных значений максимального подмагничивающего поля $H_{y \max}$. Они имеют вид, показанный на рис. 3. Для различных кратностей тока нагрузки

зависимости $V_{ст}/P_i = F_1(B_0, H_y)$ будут различны. С увеличением кратности тока удельный объем стали увеличивается. Таким образом, при заданной кратности тока нагрузки и заданном $\cos \varphi$ нагрузки удельный объем стали зависит от выбранных B_0 (или H_0 , или H_K) и H_y и при некотором значении величины B_0 при $H_y = \text{const}$ имеет минимум.

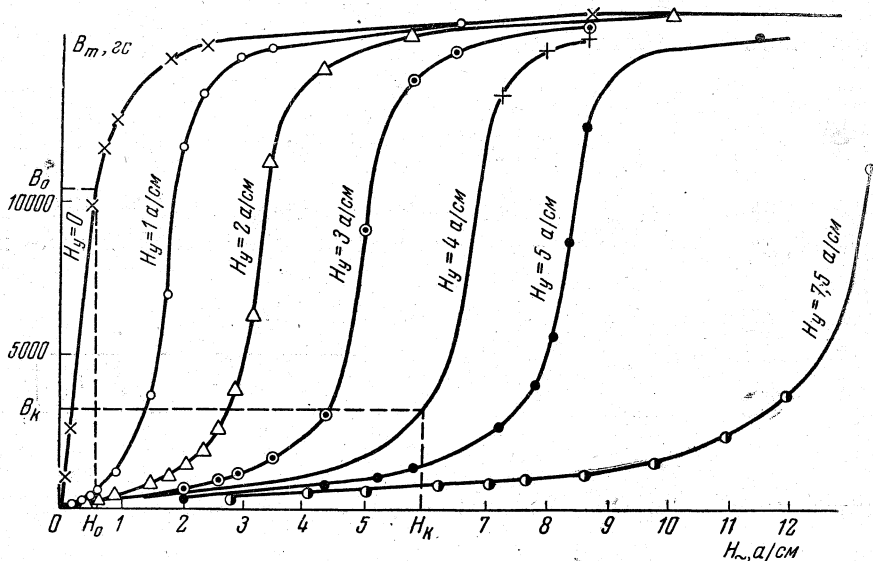


Рис. 2

Если семейство кривых $B_m = \varphi(H_y, H_y)$ аппроксимировать при помощи какой-либо функции, то по формулам (6) и (7) этот минимум может быть найден аналитически.

В зависимости от величины H_y объем стали сердечника меняется монотонно, убывая с ростом H_y .

Очень важно отметить следующее свойство характеристик: $V_{ст}/P_i = F(B_0, H_y)$, которое обнаружено при проведении ряда расчетов.

Для конкретных магнитных материалов при заданной кратности тока и $\cos \varphi_n$ объем стали сердечников при изменении B_0 , а следовательно, и H_K , но при $H_y = \text{const}$ достигает каждый раз своего минимального значения при практически постоянном для данного материала отношении H_K/H_y почти независимо от величины H_y . Обозначим это отношение $n_{опт}$.

Для материалов ЭЧАА, ХТ-18 и Н50 $n_{опт} \approx 1,4$ при $k = 10$ (см. приложение II).

Строго говоря, величина $n_{опт}$ для одной заданной кратности не является постоянной величиной, однако для практических расчетов эта величина может быть принята постоянной при работе с напряженностями поля $10 \div 50$ а/см.

Тогда целесообразно для каждого магнитного материала для ряда кратностей тока и $\cos \varphi_n$ построить графики $V_{ст}/P_i = \varphi(H_y)$ при оптимальном значении $n_{опт}$. Для построения можно использовать выражения (6) и (7), заменив в них значения H_K на $n_{опт} H_y$.

Зависимость удельного объема стали от H_y получается весьма близкой к гиперболе.

Графические зависимости $V_{ст}/P_i = \varphi(H_y)$ при $n_{опт}$ приведены на рис. 4 и 5 для материалов ЭЧАА, ХТ-18 и Н50 для кратностей тока 5 и 10 для активной нагрузки, для $\varphi_n = 90^\circ$ и $\varphi_n = 45^\circ$.

* Полученный на рис. 4 объем стали для кривой НП50 нужно умножить на 1,256.

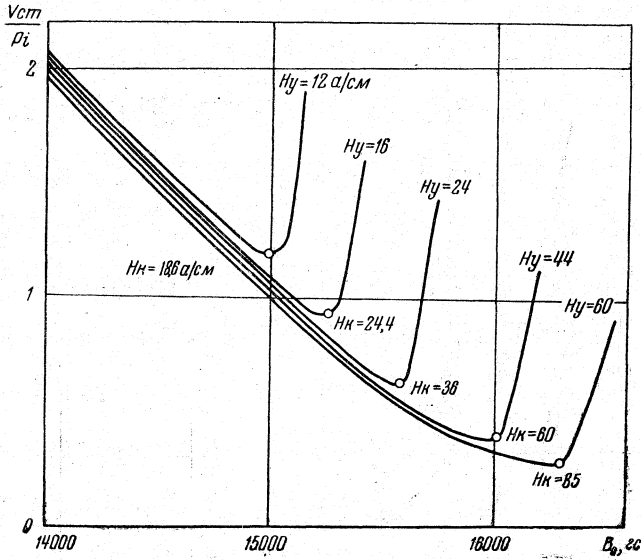


Рис. 3

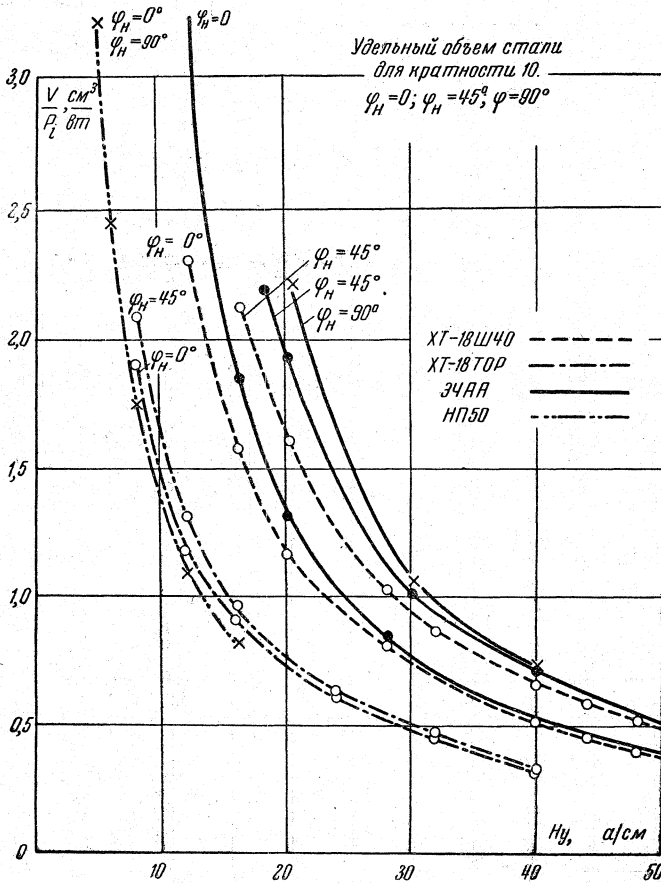


Рис. 4

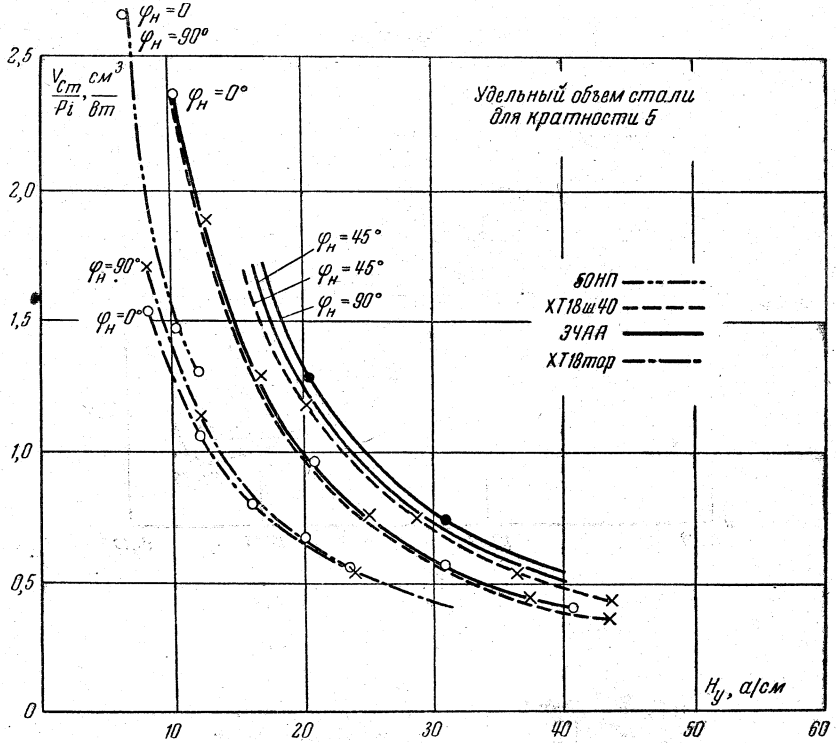


Рис. 5

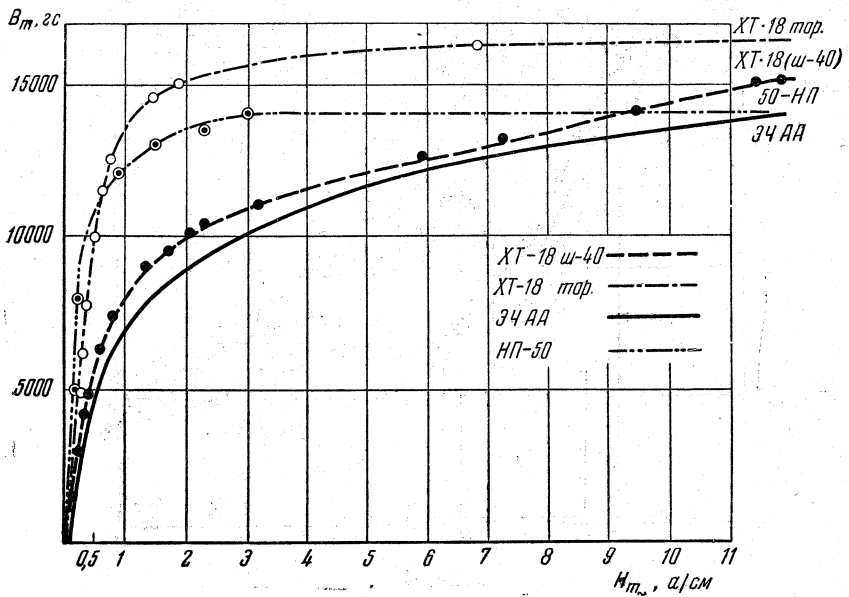


Рис. 6

На рис. 6 даны основные кривые намагничивания этих материалов.

В заключение раздела, посвященного определению объема стали сердечников, нужно отметить, что иногда расчет магнитных усилителей основывается на условии согласования нагрузки усилителя с внутренним сопротивлением обмоток усилителя при максимальном сигнале, например в работе [1].

Однако можно показать, что получение минимального объема стали при различных H_y приводит к выбору различных соотношений между сопротивлениями нагрузки и усилителя. При этом оптимальные соотношения между Z_n и $X_{др}$ меняются в зависимости от величины H_y и материала сердечника.

Покажем это. Индуктивное сопротивление обмоток дросселя $X_{др}$ может быть определено по следующей формуле:

$$X_{др} = 2 \times 2\pi/\mu \frac{0,4\pi W^2 S_{ст}}{l_{ст}} 10^{-8}.$$

Принимая во внимание, что

$$S_{ст} = \frac{V_{ст}}{l_{ст}}, \text{ а } l_{ст} = \frac{\sqrt{2} I_n W}{H_n}$$

и $\mu = \frac{B_n}{0,4\pi H_n}$, получим

$$X_{др} = 2\pi/V_{ст} \frac{H_n B_n}{I_n^2} 10^{-8} \text{ ом.} \quad (8)$$

Рассмотрим для простоты случай чисто активной нагрузки. Подставим в выражение (8) выражение (7), тогда

$$X_{др} = R_n \frac{B_n}{\sqrt{B_0^2 - B_n^2}} \quad (9)$$

или

$$\frac{X_{др}}{R_n} = \frac{B_n}{\sqrt{B_0^2 - B_n^2}}. \quad (10)$$

Полученное отношение при оптимальных режимах работы усилителя, соответствующих минимальным значениям веса стали сердечника, зависит от материала сердечника и выбранных значений H_y . Так, например, для сплава Н50 при напряженности управляющего поля $H_y = 20$ а/см

$$\frac{X_{др}}{R_n} \text{ опт} = 0,4.$$

Для сплава ЭЧАА при $H_y = 20$ а/см

$$\frac{X_{др}}{R_n} \text{ опт} = 0,72.$$

Для сплава ХТ-18 при $H_y = 23,6$ а/см

$$\frac{X_{др}}{R_n} \text{ опт} = 0,61.$$

Из этих примеров видно, что условия согласования нагрузки класть в основу расчета магнитных усилителей неправильно.

2. Определение напряженности подмагничивающего поля

Выше было показано, что с увеличением напряженности подмагничивающего поля объем стали сердечников уменьшается по закону, близкому к гиперболе.

Естественно поэтому стремление выбирать значения H_y как можно большими. Но увеличение H_y приводит к уменьшению коэффициента усиления.

Определим значение мощности управления сердечника P_y в зависимости от H_y .

Известно, что

$$P_y = I_y^2 R_y.$$

Здесь

$$R_y = \rho \frac{l_{W_y} W_y}{S_{\text{пр}}},$$

где $S_{\text{пр}} = \frac{S_{\text{оу}} k_3}{W_y}$. Тогда

$$P_y = \rho \frac{l_{W_y} W_y^2 I_y^2}{S_{\text{оу}} k_3},$$

где $S_{\text{оу}}$ — площадь окна сердечника, занимаемая обмоткой управления, l_{W_y} — средняя длина витка обмотки управления, k_3 — коэффициент заполнения.

Принимая во внимание, что

$$W_y I_y = H_y l_{\text{ст}},$$

получим

$$P_y = \rho \frac{H_y^2 l_{\text{ст}}^2 l_{W_y}}{k_3 S_{\text{оу}}}, \quad (11)$$

Это выражение еще не может быть использовано для анализа, так как значения $l_{\text{ст}}$, l_{W_y} и $S_{\text{оу}}$ зависят от объема стали, который в свою очередь зависит от H_y .

Для выяснения этих зависимостей обратимся к конструктивным соотношениям в сердечниках дроссельных магнитных усилителей.

Рассмотрим сердечники усилителей, выполненные из Ш-образных пластин.

Обозначения сторон Ш-образных пластин показаны на рис. 7. Там же показано расположение обмоток в магнитном усилителе, состоящем из двух сердечников. Такое расположение обмоток нашло наиболее широкое распространение.

Для сердечников изображенной конструкции можно написать следующие соотношения:

$$l_{\text{ст}} = 2(a + c + d), \quad (12)$$

$$S_{\text{ст}} = ab, \quad (13)$$

$$S_o = cd = S_{\text{оу}} + S_{\text{о~}}, \quad (14)$$

$$b = \frac{V}{l_{\text{ст}} a}. \quad (15)$$

Если обозначить отношение площадей окна, занимаемых обмоткой переменного тока и подмагничивающей обмоткой,

$$\frac{S_{o\sim}}{S_{oy}} = \beta, \quad (16)$$

то

$$S_{o\sim} = \beta \frac{S_o}{1 + \beta}, \quad (17)$$

$$S_{oy} = \frac{S_o}{1 + \beta}, \quad (18)$$

$$l_{W\sim} = 2 \left(a + b + \frac{2c\beta}{1 + \beta} \right), \quad (19)$$

$$l_{W_y} = 2 \left(a + 2b + \frac{2c(3\beta + 1)}{1 + \beta} \right). \quad (20)$$

Кроме этих чисто конструктивных соотношений, при расчете магнитного усилителя может быть дополнительно использовано условие нагре-

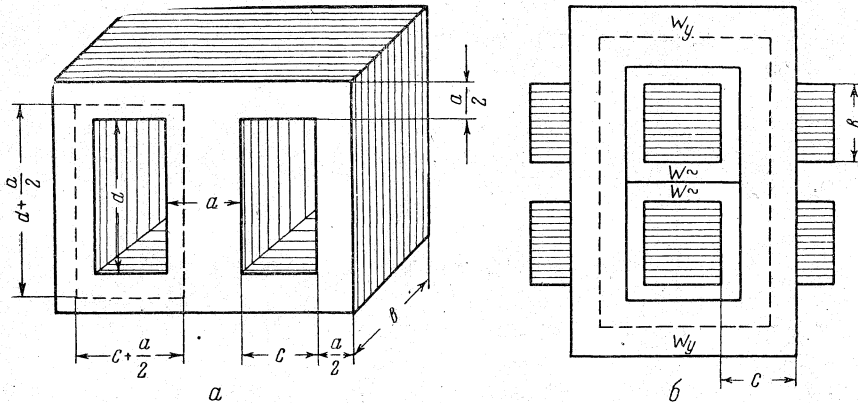


Рис. 7

ва обмоток переменного тока усилителя, которое позволяет рассчитать минимально возможную площадь окна сердечника, приходящуюся на обмотку W_{\sim} .

Это условие может быть записано следующим образом:

$$S_{o\sim} k_3 = \frac{I_K W_{\sim}}{\Delta}$$

или

$$S_{o\sim} k_3 = \frac{H_K l_{ct}}{\sqrt{2} \Delta}, \quad (21)$$

где Δ — максимально допустимая плотность тока в а/см².

Тогда, возвращаясь к определению мощности управления, подставим в уравнение (11) значение S_{oy} из уравнений (14) и (21):

$$P_y = \frac{H_y^2 l_{ct}^2 l_{W_y} \Delta \sqrt{2}}{\sqrt{2} S_o \Delta k_3 - H_K l_{ct}}. \quad (22)$$

Определим из уравнений (14), (16) и (21) значение $\beta = \left(\frac{S_o \sqrt{2} \Delta k_3}{H_K l_{ct}} - 1 \right)^{-1}$,

подставим его в уравнение (20), используем также уравнение (15), тогда

$$l_{W_y} = 2 \left[a + \frac{2V_{ст}}{al_{ст}} + 2c \left(\frac{2H_R l_{ст}}{V\sqrt{2}\Delta k_3 S_0} + 1 \right) \right]. \quad (23)$$

В связи с тем, что режим работы усилителя должен быть выбран при оптимальном значении $n_{опт}$, значение H_R в уравнениях (22) и (23) можно заменить значением $n_{опт} H_y$; тогда, произведя эту замену, подставим (23) в (22) и окончательно получим

$$P_y = \frac{2V\sqrt{2}\rho\Delta H_y^2 l_{ст}^2}{\Delta V\sqrt{2}k_3 S_0 - n_{опт} H_y l_{ст}} \left[a + \frac{2V_{ст}}{al_{ст}} + 2c \left(\frac{V\sqrt{2}n_{опт} H_y l_{ст}}{\Delta k_3 S_0} + 1 \right) \right]. \quad (24)$$

Это выражение полностью отражает зависимость мощности управления от напряженности поля управления при выбранном штампе пластин сердечника.

Для того чтобы использовать это выражение для расчета усилителя, необходимо построить график зависимости $k_y = \frac{P_H}{P_y}$ от H_y , учитывая при построении, что $V_{ст}$ сердечника меняется с изменением H_y . Значения $V_{ст}$ сердечника могут определяться из графиков рис. 4 и 5 или из им подобных в зависимости от материала, кратности тока и $\cos\varphi_H$. Если коэффициент усиления задан, то максимально возможное значение напряженности подмагничивающего поля определяется однозначно.

3. Определение объема меди усилителя

Для определения общего веса усилителя, или его габаритов, или стоимости необходимо, кроме объема стали сердечников, знать также объем, занимаемый обмотками усилителя.

Объем меди усилителя, конструкция которого изображена на рис. 7, легко определить через размеры штампа пластин и толщину пакета стали дросселей:

$$V_M = 2cd \left[(a + 2c) \frac{2\beta + 1}{\beta + 1} + 2b \right]. \quad (25)$$

Используя выражения (15), (16), (14) и (21) и заменяя H_R на $n_{опт} H_y$, преобразуем уравнение (25). Тогда

$$V_M = 2cd \left[(a + 2c) \left(\frac{n_{опт} H_y l_{ст}}{V\sqrt{2}\Delta k_3 S_0} + 1 \right) + \frac{2V_{ст}}{l_{ст} a} \right]. \quad (26)$$

Это уравнение полностью определяет зависимость объема меди от напряженности управляющего поля. При построении графика этой зависимости необходимо так же, как и в предыдущем случае, учитывать зависимость $V_{ст}$ от H_y .

Благодаря тому, что при увеличении H_y $V_{ст}$ падает, объем меди усилителя при выбранном штампе с изменением H_y меняется очень мало.

Для того чтобы определить вес меди G_M , необходимо объем меди V_M умножить на коэффициент заполнения и на удельный вес меди γ_M :

$$G = V_M k_3 \gamma_M. \quad (27)$$

4. Выбор штампа сердечников усилителя

Выше были выведены формулы для определения мощности управления и объема меди усилителя в зависимости от напряженности управляющего поля. Для того чтобы пользоваться этими уравнениями, необходимо предварительно выбрать размеры пластин сердечника, т. е. штамп.

Авторами этой работы были определены оптимальные соотношения штампа магнитного усилителя с точки зрения получения минимального объема меди и максимального коэффициента усиления.

Проведенные исследования показывают, что наилучшим соотношением в штампе является*

$$\frac{d}{c} = 3. \quad (28)$$

Таким образом, наилучшими для магнитных усилителей являются штампы с вытянутым вдоль длины стержней окном, как показано на рис. 7, а. Однако необходимо отметить, что изменение d/c в пределах от 2 до 5 вызывает незначительное уменьшение коэффициента усиления до 2,5% и увеличение объема меди до 5%, благодаря тому, что максимум и минимум этих величин очень пологи. Поэтому практически большинство существующих трансформаторных штампов может быть использовано для пластин сердечников магнитных усилителей.

Более сложным вопросом при выборе штампа усилителей является выбор остальных размеров пластины с точки зрения получения максимального коэффициента усиления и минимального объема меди.

Работа, проводимая авторами в этом направлении с целью получения простых инженерных решений, еще не может считаться законченной, однако проведенные для ряда штампов исследования позволяют сделать вывод, что целесообразно выбирать такие штампы, для которых

$$\frac{b}{a} = 0,4 \div 2,5.$$

5. Ход расчета усилителя

Для расчета усилителей необходимо иметь характеристики $V_{ст}/P_i = \varphi(H_y)$ при заданной кратности тока и заданном $\cos \varphi_n$. Для построения этих характеристик нужно использовать семейство характеристик материала $B_{\sim} = \varphi(H_{\sim}, H_y)$, снятое в эффективных значениях в том случае, если у рассчитываемого усилителя нагрузка включена на переменном токе, и в средних значениях, если нагрузка включена через выпрямители. (В последнем случае для расчета имеет значение только активная составляющая нагрузки.)

Метод построения зависимости удельного объема стали от напряженности подмагничивающего поля изложен выше. Повторим, что кривые $V_{ст}/P_i = \varphi(H_y)$ для каждого магнитного материала для заданной кратности и $\cos \varphi_n$ могут быть построены один раз (для типовых сердечников), а затем могут быть использованы для расчетов магнитных усилителей на различные мощности, с различными коэффициентами усиления.

Конечно, при этом точность расчетов будет зависеть от качества сборки сердечников и от степени повторимости магнитных характеристик материалов сердечников от плавки к плавке. Но чтобы полностью

* Несколько иное выражение для оптимальных соотношений размеров получено независимо от авторов М. Н. Губановым который исходил только из условия получения минимума меди.

исключить эти погрешности, есть только один путь — путь расчета магнитных усилителей после их изготовления, т. е. путь, совершенно неприемлемый. Поэтому для инженерных расчетов необходимо иметь характеристики $V_{ст}/P_i = \varphi(H_y)$, построенные по некоторым средним данным для каждого типа сплава и для типовых сердечников.

Ход расчета усилителя, если по каким-либо соображениям задан штамп, несложен.

Для выбранного штампа по формулам (24) и (26) строятся зависимости коэффициента усиления и объема меди от напряженности управляющего поля.

По заданной величине коэффициента усиления определяется необходимое значение H_y , а следовательно, и объем стали и объем меди. При заданном штампе такой метод расчета позволяет получить оптимальные параметры усилителя. Однако в том случае, если есть возможность выбрать штамп из нескольких типов штампов, то необходимо произвести сравнения путем построения графических зависимостей $P_y = \varphi(H_y)$ по формуле (24) и $V_m = \Phi(H_y)$ по формуле (26) и выбрать наиболее подходящий штамп, так как при одном и том же коэффициенте усиления у различных штампов мы получим различный вес усилителя и различные соотношения весов меди и стали, что в некоторых случаях может иметь существенное значение.

Для того чтобы свести число сравниваемых штампов к минимуму, нужно в предполагаемом диапазоне изменений максимального подмагничивающего поля H_y подсчитать значение отношения $\frac{b}{a} = \frac{V_{ст}}{a^2 l_{ст}}$

и оставить для окончательного сравнения только такие штампы, для которых $\frac{b}{a} \approx 0,4 \div 2,5$.

После того как штамп выбран, определена необходимая максимальная напряженность управляющего поля, а следовательно, и объем стали, остальные параметры усилителя определяются по следующим формулам.

$$\text{Толщина пакета каждого дросселя } b = \frac{V_{ст}}{a l_{ст}}.$$

$$\text{Сечение среднего стержня дросселя } S_{ст} = ab.$$

Число витков обмотки переменного тока каждого дросселя

$$W_{\sim} = \frac{H_y n_{опт} l_{ст}}{\sqrt{2} I_R}.$$

$$\text{Диаметр провода обмотки переменного тока } d_{\sim} = \sqrt{\frac{4 I_R}{\pi \Delta}},$$

где Δ — плотность тока в а/см².

Напряжение питания усилителя

$$U_{\sim} = \sqrt{\left(U_0 + \frac{I_R}{k} X_H\right)^2 + \left(\frac{I_R}{k}\right)^2 (R_H + R_{\sim})^2},$$

где

$$U_0 = 4,44 f 2W_{\sim} S_{ст} B_0 10^{-8}.$$

Значение B_0 должно быть определено по основной кривой намагничивания данного материала, так как $H_0 = \frac{H_k}{k} = \frac{H_y n_{опт}}{k}$ известно.

Величина R_{\sim} может быть определена по следующей формуле:

$$R_{\sim} = \rho \frac{2W_{\sim}^4}{\pi d_{\sim}^2} l_{w_{\sim}} = \frac{16 \rho}{\pi d_{\sim}^2} W_{\sim} \left(a + b + \sqrt{2} c \frac{H_y n_{опт} l_{ст}}{\Delta k_3 S_0} \right).$$

Число витков обмотки управления может быть определено, если выбрано (например, из условий согласования) сопротивление обмотки управления R_y :

$$W_y = \sqrt{\frac{S_{oy} k_s R_y}{\rho l_{wy}}}$$

где S_{oy} может быть определено из выражений (14) и (21), а l_{wy} из выражения (23).

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПРИМЕР РАСЧЕТА МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Задано: $P_H = 50$ вт, $I_H = 1$ а (работа при максимальном сигнале кратковременна), $k = 10$, $\cos \varphi_H = 1$, коэффициент усиления $k_y = 20$, т. е. $P_y = 2,5$ вт, $R_y = 100$ ом.

Материал сердечника ХТ-18.

1. Пользуясь кривой $V_{ст} / P = f(H_y)$ для ХТ-18 Ш 40 (рис. 4), определяем для заданной мощности 50 вт величину объема сердечника $V_{ст}$ для различных значений H_y . В связи с тем, что коэффициент усиления ($k_y = 20$) невысок, ограничиваемся значениями $H_y = (15 \div 40)$ а/см.

H_y , а/см	10	15	20	30	40
$V_{ст}$, см ³	150	87,5	58	37,0	25,0

2. Для имеющихся в наличии штампов

Штамп	a, см	c, см	d, см	$l_{ст}$, см
Ш-40	4,0	4,0	9,0	34,0
Ш-32	3,2	3,2	8,0	28,8
Ш-20	2,0	1,25	4,5	15,5
Ш-12	1,2	0,9	3,0	10,2

определяем значение

$$\frac{b}{a} = \frac{V_{ст}}{a^2 l_{ст}}$$

для выбранного диапазона изменения H_y .

Значения $\frac{b}{a}$

Штамп	H_y , а/см			
	b/a			
	15	20	30	40
Ш-40	0,16	0,106	0,068	0,046
Ш-32	0,296	0,196	0,125	0,085
Ш-20	1,41	0,94	0,6	0,4
Ш-12	5,95	3,95	2,52	1,7

Из этой таблицы видно, что наиболее подходящим является штамп Ш-20, у которого b/a находится в пределах $0,4 \div 2,5$.

Дальнейший расчет усилителя можно было бы вести только на этот штамп, но здесь ради наглядности мы рассчитаем все приведенные штампы.

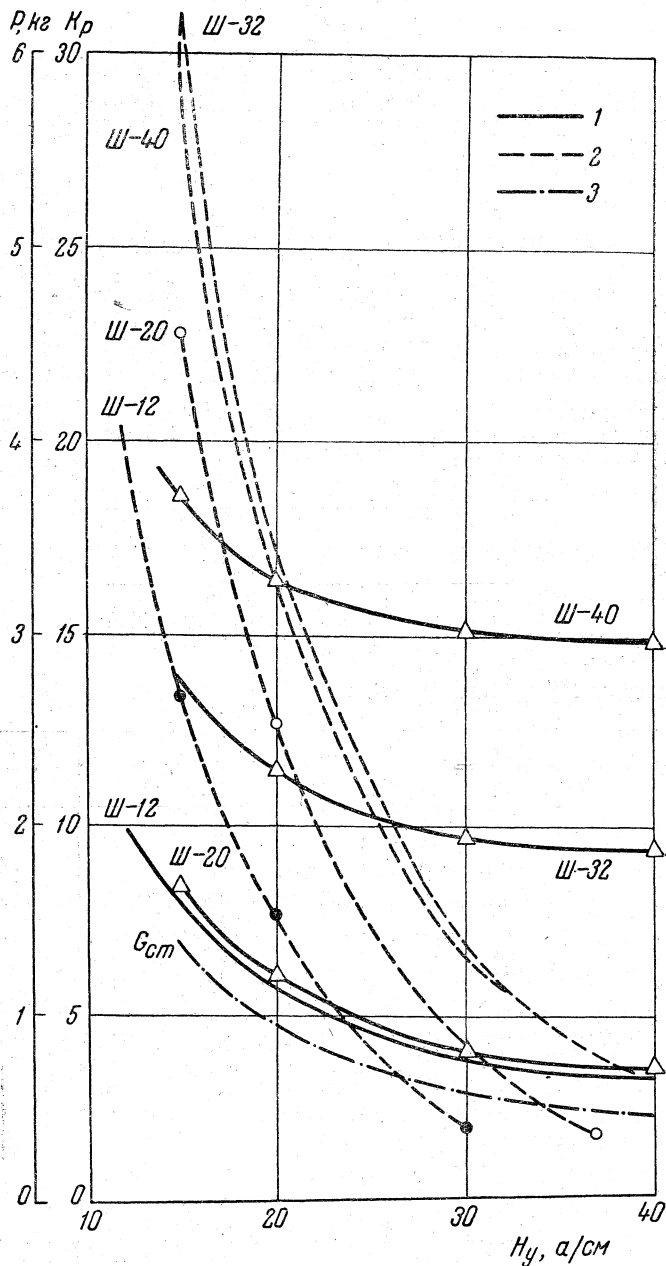


Рис. 8. 1 — общий вес дросселя, 2 — коэффициент усиления, 3 — вес стали дросселя

3. Определяем зависимость $k_y = \varphi(H_y)$.

Согласно уравнению (24)

$$P_y = \frac{2\sqrt{2} \rho \Delta H_y^2 l_{ст}^2}{\Delta V \sqrt{2} k_3 S_0 - n_{опт} H_y l_{ст}} \left[a + \frac{2V_{ст}}{al_{ст}} + 2c \left(\frac{\sqrt{2} n_{опт} H_y l_{ст}}{\Delta k_3 S_0} + 1 \right) \right]$$

В этом уравнении значение плотности тока Δ выбираем равным 600 а/см^2 , так как усилитель при максимальном сигнале работает кратковременно. Коэффициент заполнения выбираем равным $0,25$.

Значение $n_{\text{опт}}$ для кратности тока 10 составляет $1,4$. Остальные параметры определяются из таблицы размеров штампов.

Пользуясь таблицей $V_{\text{ст}} = f(H_y)$, вычисляем зависимость $P_y = \varphi(H_y)$.

На рис. 8 строим значение коэффициента усиления $k_y = P_{\text{н}}/P_y$ в зависимости от H_y для всех приведенных штампов.

4. Определяем для каждого штампа объем меди усилителя в зависимости от H_y согласно выражению (26):

$$V_{\text{м}} = 2S_0 \left[(a + 2c) \left(\frac{n_{\text{опт}} H_y l_{\text{ст}}}{\sqrt{2} \Delta k_3 S_0} + 1 \right) + \frac{2V_{\text{ст}}}{l_{\text{ст}} a} \right].$$

5. Определяем общий вес усилителя:

$$G_y = 2V_{\text{ст}} \gamma_{\text{ст}} + k_3 V_{\text{м}} \gamma_{\text{м}},$$

где $\gamma_{\text{ст}}$ — удельный вес стали, $\gamma_{\text{м}}$ — удельный вес меди.

Для ХТ-18 $\gamma_{\text{ст}} = 7,8 \text{ г/см}^3$, $\gamma_{\text{м}} = 8,9 \text{ г/см}^3$, $k_3 = 0,25$. Зависимость весов усилителей для приведенных штампов строим на рис. 8.

6. Определяем значение максимальной напряженности поля при $k_y = 20$.

Для штампа Ш-12 $H_y = 12 \text{ а/см}$, $G_y = 2 \text{ кг}$.

Для штампа Ш-20 $H_y = 16 \text{ а/см}$, $G_y = 1,5 \text{ кг}$.

Для штампа Ш-32 $H_y = 18,5 \text{ а/см}$, $G_y = 2,4 \text{ кг}$.

Для штампа Ш-40 $H_y = 18 \text{ а/см}$, $G_y = 3,4 \text{ кг}$.

Таким образом, выбор штампа Ш-20, при котором в усилителе отношение b/a (при $H_{y \text{ макс}}$) находится в пределах $0,4 \div 2,5$, позволяет получить заданный коэффициент усиления при минимальном весе усилителя.

7. Определяем остальные параметры усилителя для штампа Ш-20.

Объем стали сердечника при $H_y = 16 \text{ а/см}$ находим из кривой $G_{\text{ст}}$ на рис. 8:

$$V_{\text{ст}} = \frac{G_{\text{ст}}}{2\gamma_{\text{ст}}} = 78,5 \text{ см}^3, S_{\text{ст}} = \frac{V_{\text{ст}}}{l_{\text{ст}}} = 5,06 \text{ см}^2$$

толщина пакета $b = 2,53 \text{ см}$.

Число витков обмоток переменного тока каждого дросселя

$$W_{\sim} = \frac{H_y n_{\text{опт}} l_{\text{ст}}}{\sqrt{2} I_{\text{н}}}, W_{\sim} = \frac{16 \times 1,4 \times 15,5}{\sqrt{2}} = 248 \text{ витков.}$$

Диаметр провода обмотки переменного тока

$$d_{\sim} = \sqrt{\frac{4 I_{\text{н}}}{\pi \Delta}}, d_{\sim} = \sqrt{\frac{4}{\pi 600}} = 0,046 \text{ см.}$$

Сопротивление обмоток переменного тока

$$R_{\sim} = 16 \rho \frac{W_{\sim}}{\pi d_{\sim}^2} \left(a + b + \sqrt{2} c \frac{H_y n_{\text{опт}} l_{\text{ст}}}{\Delta k_3 S_0} \right),$$

$$R_{\sim} = \frac{16 \times 248}{57 \times 10^4 \pi \times 0,00212} \left(2 + 2,53 + 2,5 \frac{16 \times 1,4 \times 15,5}{600 \sqrt{2} 0,25 \times 5,63} \right),$$

$$R_{\sim} = 5,850 \text{ ом.}$$

Для определения напряжения питания определим предварительно U_0 . Для этого найдем B_0 по основной кривой намагничивания материала ХТ-18 Ш-40 (рис. 6):

$$H_0 = \frac{H_y n_{\text{опт}}}{k} = \frac{16 \times 1,4}{10} = 2,3 \text{ а/см,}$$

$$B_0 = 10400 \text{ гс,}$$

$$U_0 = 4,44 f 2W_{\sim} S_{\text{ст}} B_0 10^{-8},$$

$$U_0 = 4,44 \times 50 \times 2 \times 248 \times 5,06 \times 10400 \times 10^{-8} = 61,2 \text{ в.}$$

Напряжение питания

$$U_{\sim} = \sqrt{U_0^2 + \left(\frac{I_K}{k}\right)^2 (R_H + R_{\sim})^2},$$

$$U_{\sim} = \sqrt{61,2^2 + (0,1)^2 55,8^2} = 61,5 \text{ в.}$$

$$\text{к. п. д.} = \frac{R_H}{R_H + R_{\sim}} 100\% = \frac{50}{55,8} 100\% = 89\%.$$

Число витков обмотки управления определяем по формуле

$$W_y = \sqrt{\frac{S_{oy} k_3 R_y}{\rho l_{wy}}},$$

где

$$S_{oy} = S_o - S_{o\sim} = S_o - \frac{\pi d_{\sim}^2}{4} \frac{W_{\sim}}{k_3}, \quad S_{oy} = 5,63 - 1,73 = 3,9,$$

$$l_{wy} = 2 \left[a + 2b + \frac{2c(3\beta + 1)}{1 + \beta} \right].$$

Здесь

$$\beta = \frac{S_{o\sim}}{S_{oy}} = \frac{1,73}{3,9} = 0,443.$$

Отсюда

$$l_{wy} = 2 \left[2 + 22,53 + \frac{21,25(3 \times 0,443 + 1)}{1 + 0,443} \right] = 22,12.$$

Тогда

$$W_y = \sqrt{\frac{3,9 \times 0,25 \times 100 \times 57 \times 10^4}{22,12}} = 1590 \text{ в.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Таблица значения $n_{\text{опт}} = \frac{H_K}{H_y}$

k = 5													
50НП			ХТ-18 (гор)			ХТ-18 (Ш40)				ЭЧАА			
cosφ _H	1	0	cosφ _H	1	0	cosφ _H	1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	0	cosφ _H	1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	0
1	1,63	—	10	1,7	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,61	1,41	15	1,6	1,5	—	—	—	—	—	1,37	—	—
5	1,6	—	20	1,58	1,48	20	1,49	1,4	1,4	20	1,42	1,5	1,5
10	1,55	1,41	25	1,54	1,44	25	1,47	1,36	1,36	—	—	—	—
12,5	1,53	1,41	30	1,52	1,43	30	1,47	1,36	1,36	30	1,55	1,5	1,47
15	1,51	1,41	40	1,5	1,43	40	1,47	1,36	1,36	40	1,55	1,5	1,43
κ = 10													
1	1,56	1,41	15	1,53	1,52	—	—	—	—	—	1,2	—	—
10	1,53	—	20	1,53	1,5	20	1,42	1,35	—	20	1,4	—	1,4
15	1,51	—	30	1,53	1,5	30	1,42	1,35	—	30	1,4	—	1,4
20	1,49	1,40	50	1,50	1,5	40	1,42	1,35	—	40	1,45	—	1,4

Выводы

Рассмотренный метод расчета дроссельных магнитных усилителей при наличии кривых удельной мощности позволяет легко и быстро рассчитывать магнитные усилители мощности с минимальными габаритами или весом. Точность метода определяется близостью кривых намагничивания сердечников, использованных для построения кривых удельной мощности и сердечников, из которых будет изготовлен рассчитываемый магнитный усилитель. О возможности применения тех или иных кривых удельной мощности для расчета усилителей из конкретного материала можно судить, сравнивая основные кривые намагничивания, поэтому в дальнейшем авторы предполагают опубликовать кривые удельной мощности различных материалов для типовых сердечников с приложением основной кривой намагничивания.

В заключение нужно отметить, что приведенный метод расчета может быть целиком распространен на усилители с внутренней обратной связью при условии, что под расчетным коэффициентом усиления усилителя k_u будет пониматься величина, в $(1 - k_{oc})^{-2}$ раз меньшая, чем действительная величина коэффициента усиления.

В связи с тем, что схема усилителя с внутренней обратной связью эквивалентна схеме с параллельным включением обмоток усилителя, число витков переменного тока каждого сердечника усилителя выбирается вдвое большим, чем для усилителя без обратной связи.

Для усилителей с внешней обратной связью необходимо, кроме изменения расчетной величины коэффициента усиления, учитывать, что часть окна сердечника должна быть занята обмоткой обратной связи.

Этот же метод расчета положен авторами в основу проектирования двухтактных магнитных усилителей и усилителей с тороидальными сердечниками.

Поступила в редакцию
7 мая 1954 г.

Цитированная литература

1. Розенблат М. А. Магнитные усилители. Госэнергоиздат, 1949.
2. Рывкин А. М. Амплитудный метод расчета дросселей насыщения. Электричество, № 8, 1950.
3. Губанов М. Н. Определение оптимальных размеров сердечника и числа витков регулирующих дросселей. Автоматика и телемеханика, № 1, 1954.
4. Марьяновский Д. И. и Казанцева И. А. Упрощенный расчет дросселей насыщения. Электричество, № 3, 1951.
5. Пашенцев И. Д. Приближенный расчет магнитных усилителей. Сборник трудов ЛЭТИИЖТ, вып. IV, 1952.
6. Богословский А. С. Графический метод анализа и расчета ферромагнитных усилителей мощности. Электричество, № 10, 1950.