

Э. Л. ОГАНЕСЯН

## РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОССЕЛЯ НАСЫЩЕНИЯ

В статье излагается метод расчета характеристики дросселя насыщения (ДН) с последовательно соединенными рабочими обмотками и свободными четными гармониками тока (рис. 1) с применением кусочно-линейной аппроксимации естественной магнитной характеристики.

Метод исходит из теории ДН с последовательно соединенными рабочими обмотками и свободными, четными гармониками, изложенной в [1]. В отличие от идеального ДН, в реальном, ампервитки будут равны сумме ампервитков насыщения и ампервитков возбуждения. Для определения ампервитков возбуждения в рассматриваемом случае очень важным оказывается уравнение потоков в сердечниках, которые справедливы для всех ДН со свободными четными гармониками тока независимо от наличия обратной связи. Не ставятся также условия ограничивающие петлю гистерезиса, кроме того, что относительно выходного сопротивления импеданс ненасыщенного ДН должен быть высоким, а насыщенного низким [1]. Так как дроссели А и Б идентичные, то решая уравнения ампервитков для магнитных цепей А и Б, получим следующие выражения:

для ампервитков управления

$$i_p \omega_p = \frac{i_{\gamma, A} \omega_p + i_{\gamma, B} \omega_p}{2}, \quad (1)$$

для рабочих ампервитков

$$i_p \omega_p = \frac{i_{\gamma, A} \omega_p - i_{\gamma, B} \omega_p}{2}. \quad (2)$$

Намагничивающие ампервитки  $i_{\gamma, A} \omega_p$  и  $i_{\gamma, B} \omega_p$  можем выразить через потоки  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$  и магнитную проводимость сердечников

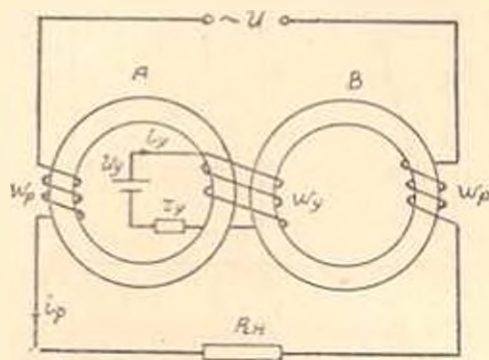


Рис. 1. Схема дросселя насыщения.

$$i_y \omega_y = \frac{\Phi_A}{2 \cdot 0,4 \pi G_{m, A}} + \frac{\Phi_B}{2 \cdot 0,4 \pi G_{m, B}}; \quad (3)$$

$$i_p \omega_p = \frac{\Phi_A}{2 \cdot 0,4 \pi G_{m, A}} - \frac{\Phi_B}{2 \cdot 0,4 \pi G_{m, B}}. \quad (4)$$

Очевидно в интервале возбуждения намагничивающие  $AW$  — определенные величины, а в интервале насыщения, скажем, когда насыщен сердечник А,  $G_{m, A} = 0$ , величины токов будут зависеть от других факторов, т. е. появятся токи насыщения и трансформации. Для определения  $AW$  возбуждения, которые имеют место и в интервале насыщения, аппроксимируем магнитную характеристику двумя отрезками:

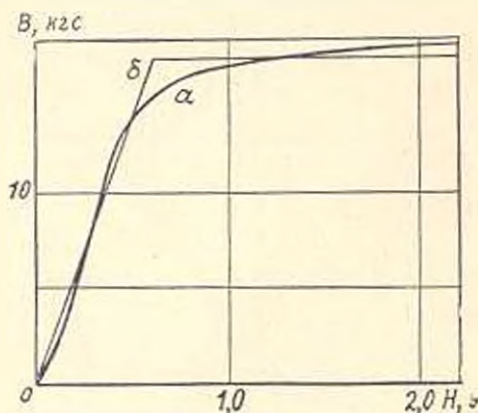


Рис. 2. Магнитные характеристики;  $\alpha$  — естественная;  $\beta$  — аппроксимированная.

выражения для токов возбуждения справедливы не только для интервала возбуждения, но и для интервала насыщения.

$$i_y \omega_y = \frac{\Phi_A + \Phi_B}{2 \cdot 0,4 \pi G_m}, \quad (5)$$

$$i_p \omega_p = \frac{\Phi_A - \Phi_B}{2 \cdot 0,4 \pi G_m}, \quad (6)$$

где  $G_m = G_{m, A} = G_{m, B} = \text{const}$  магнитная проводимость для аппроксимированной характеристики в ненасыщенной зоне.

Действительно, согласно [1]  $\Phi_A + \Phi_B = \text{const}$  в течение всего полупериода, следовательно должно быть постоянным и  $i_y \omega_y$  в выражении (5). Для доказательства, что и в действительности  $i_y \omega_y = \text{const}$ , предположим, что трансформация тока из рабочей обмотки в обмотку управления исключена тем или иным способом. Тогда в цепи управления будут течь только токи возбуждения, обусловленные напряжением управления и равные  $i_y = \frac{U_y}{r_y} = \text{const}$ . Следовательно выражение (5) справедливо во всем полупериоде.

наклонным и горизонтальным (рис. 2). Это внесет в (3) и (4) некоторую ошибку, однако позволит проще показать физический процесс и доказать предположение о величине токов возбуждения в интервале насыщения. Ошибка вносимая аппроксимированием, учитывается выбором точки отсчета на действительной кривой для каждого значения угла насыщения  $\alpha$ .

Покажем, что следующие выражения для токов возбуж-

Значение  $\frac{\Phi_B}{2 \cdot 0,4 \pi G_m}$  конечно и постоянно в интервале насыщения (исключая случай, когда оба дросселя насыщены), поэтому из (5) следует, что и  $\frac{\Phi_A}{2 \cdot 0,4 \pi G_m} = \text{const}$  в интервале насыщения. Тогда (6) также справедливо, а  $i_p \omega_y = \text{const}$  в интервале насыщения.

Уравнение потоков в сердечниках  $A$  и  $B$  имеют следующий вид [1]:

$$\Phi_A = -\frac{1}{4f} \cdot \frac{10^8}{\omega_p} \left( \frac{U_s}{2} + U \frac{\cos \alpha - \cos \omega t}{2} \right), \quad (7)$$

$$\Phi_B = \frac{1}{4f} \cdot \frac{10^8}{\omega_p} \left( \frac{U_s}{2} - U \frac{1 - \cos \omega t}{2} \right). \quad (8)$$

В силу (5)–(8) получим

$$i_y \omega_y = -\frac{\pi \omega_p U}{4 \omega L} \left( \frac{2}{x} - 1 + \cos \alpha \right), \quad (9)$$

$$i_p \omega_p = \frac{\pi \omega_p U}{2 \omega L} \cdot \frac{1 + \cos \alpha - \cos \omega t}{1}, \quad (10)$$

где  $L = 2 \cdot 0,4 \pi G_m \omega_p 10^8$  — индуктивность в рабочей цепи ненасыщенного ДН;

$x = \frac{U}{U_s}$  — относительное возбуждение ( $U$  — напряжение сети,

$U_s = 2U_s$  — напряжение насыщения последовательно соединенных рабочих обмоток).

Так как  $i_y \omega_y = \text{const}$ , то средние значения ампервитков возбуждения будут равны

$$I_y \omega_y = I_y \omega_y. \quad (11)$$

Функция  $i_p \omega_p$  знакопеременна при  $0 < \omega t < \alpha$  и постоянна при  $\alpha < \omega t < \pi$ . Тогда среднее значение  $i_p \omega_p$  будет

$$I_p \omega_p = -\frac{1}{\pi} \int_0^\beta i_p \omega_p d(\omega t) + \frac{1}{\pi} \int_\beta^\pi i_p \omega_p d(\omega t) + \\ + \frac{(\pi - \alpha) \omega_p U}{2 \omega L} \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{2}, \quad (12)$$

где  $\beta = \arccos \frac{1 + \cos \alpha}{2}$  — угол, при котором  $i_p \omega_p = 0$ .

Решая (12), получим

$$I \omega_p = \frac{\omega_p U}{\omega L} \cdot \delta, \quad (13)$$

где  $\delta = \delta_1 + \frac{\pi - \alpha}{2} \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{2}$ , а в свою очередь

$$\delta_1 = \sin \left( \arccos \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) - \frac{\sin \alpha}{2} + \frac{1 + \cos \alpha}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

Полученное выражение громоздкое и его можно заменить следующим более простым приближенным выражением

$$\delta_1 \approx \sqrt{1 - \left( \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)^2} - \frac{\sin \alpha}{4}.$$

Очевидно  $\delta$  является функцией, независимой от параметров ДН, поэтому можно построить график  $\delta(\alpha)$  (рис. 3) и использовать его при расчетах характеристик различных ДН.

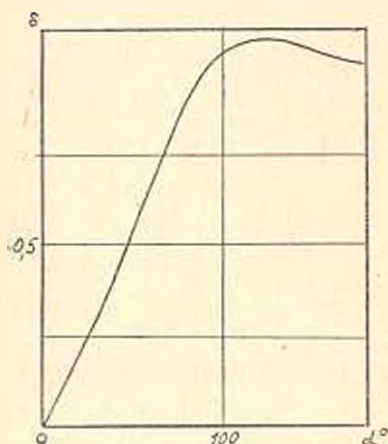


Рис. 3. Зависимость  $\delta$  от угла насыщения.

В интервале насыщения в  $w_p$  мы будем иметь не только ток насыщения равный  $\frac{U_m}{R_{\text{нак}}} \cdot \sin \omega t$ , но и ток возбуждения. Строгого математического доказательства, что в интервале насыщения течет сумма этих токов, нет, но одно рассуждение и кривые токов на осциллографе делают это очевидным. Если предположим обратное, т. е. что в интервале насыщения в рабочей цепи имеем только ток насыщения

$$i_p = \frac{U_m}{R_{\text{нак}}} \cdot \sin \omega t,$$

то при  $\omega t = \pi n$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ )  $i_p = 0$ , тогда как согласно (10) ток в рабочей цепи в начале каждого полупериода отличен от нуля (кроме случая полного насыщения обоих сердечников). Значит, кроме тока насыщения протекает и ток  $i_n$ , обусловленный энергией магнитного поля, хотя и считаем, что потоки  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$  не меняются в интервале насыщения.

Ампервитки насыщения трансформируются без потерь в обмотку управления ненасыщенного дросселя  $B$ , работающего в режиме трансформатора при коротком замыкании, вторичная обмотка которого — цепь управления ДН. А потери от  $\Phi_B$  учтены уже в токах возбуждения, т. е.

$$I_y n_y = I_p w_p = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi i_p w_p d(\omega t) = \frac{w_p U}{R_{\text{нак}}} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}. \quad (15)$$

Тогда коэффициент усиления по АЧ будет

$$K_{\text{АЧ ДН}} = \frac{I_p w_p}{I_y w_y} = \frac{I_p w_p + I_n w_p}{I_y w_y + I_p w_p}. \quad (16)$$

Учитывая, что для уменьшения ошибки вносимой аппроксимацией магнитной характеристики будем получать различные  $\omega L$  для

АВ возбуждения цепи управления и рабочей цепи, обозначим индуктивность для  $I_p \omega_p$  через  $L'$ .

Подставляя значения ампервитков в (16), окончательно получим:

$$K_{АВ, ДН} = \frac{\frac{\omega_p U}{\omega L'} \cdot \delta(\alpha) + \frac{\omega_p U}{R_{нмх}} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}}{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{\omega_p U}{\omega L} \left( \frac{2}{\kappa} - 1 + \cos \alpha \right) + \frac{\omega_p U}{R_{нмх}} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}} \quad (17)$$

где

$$\delta(\alpha) = \sqrt{1 - \left( \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)^2} = \frac{\sin \alpha}{4} + \frac{\pi - \alpha}{2} \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{2}$$

Из рис. 4 видно, что потоки, описываемые уравнениями (8) и (9), при любом значении  $\alpha$  доходят до потока насыщения. Поэтому удобнее и

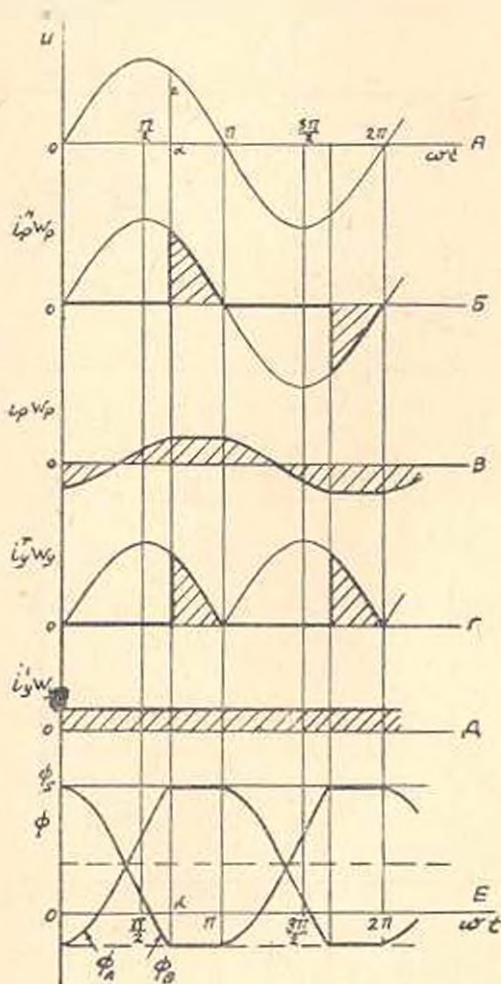


Рис. 4. А — кривая напряжения сети; Б — кривая ампервитков насыщения; В — кривая ампервитков возбуждения в рабочей обмотке; Г — кривая трансформируемых ампервитков в обмотку управления; Д — кривая ампервитков возбуждения в обмотку управления; Е — кривая потоков в сердечниках.

правильнее брать за начало координат точку на кривой магнитной характеристики, соответствующей  $U_s^*$  (точка  $O'$  на рис. 2). Абсолютные значения  $AW$  получаем, откладывая вниз от  $U_s^*(\Phi_s)$  значения  $U \left( \frac{2}{x} - 1 + \cos \alpha \right)$  или соответствующего ему потока. Ампервитки  $\frac{w_r U}{\omega L}$  оп-

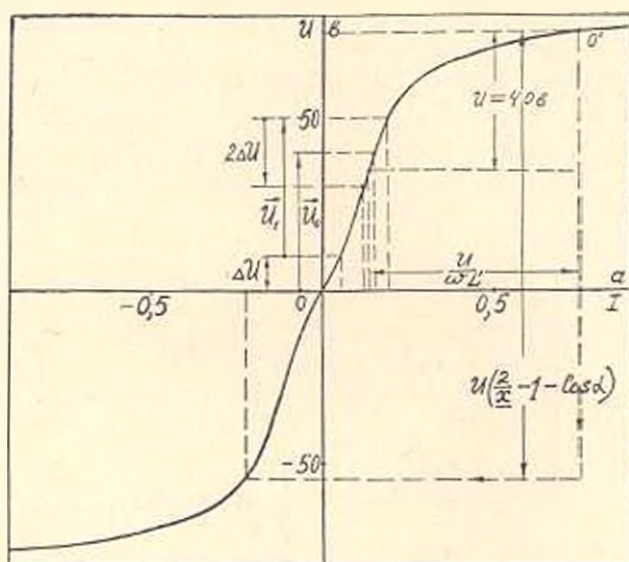


Рис. 5. Магнитная кривая.

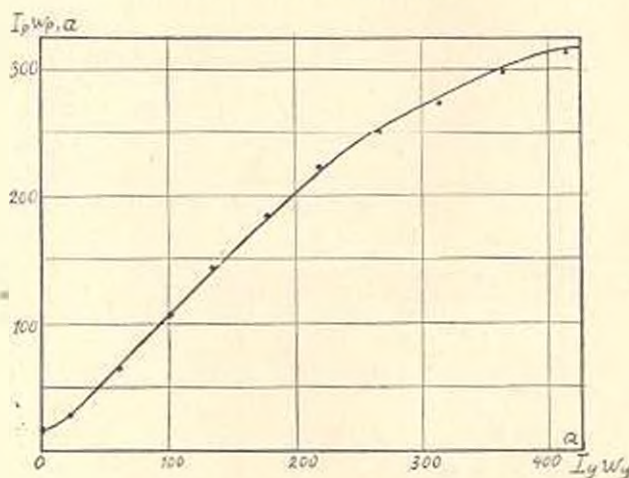


Рис. 6. Характеристика ДН.

ределяются один раз как функция от  $U(\Phi)$ , также откладывая значение  $U(\Phi)$  вниз от точки  $U_s^*(\Phi_s)$ .

При аналитическом способе расчета достаточно выразить магнитную кривую (обе ветки) одним из известных способов [2] и учесть

произведенное преобразование координат. Полученная формула (17) позволяет произвести аналитическое исследование характеристики ДН, значение которой увеличивается с появлением ДН с безиндуктивной цепью управления [3], а также решить обратную задачу, т. е. получить параметры ДН для обеспечения требуемой характеристики.

*Пример:* Рассчитать характеристику ДН при сопротивлении в рабочей цепи  $R_{\text{max}} = 12,5$  ом, напряжении сети  $U = 40$  в, частоте  $f = 50$  гц, числе витков рабочей обмотки  $\omega_p = 100$ . Магнитная характеристика в масштабе вольт-амперной характеристики приведена на рис. 5.

Принимая  $U_s = 75$  в, получаем относительное возбуждение  $x = \frac{U}{U_s} = 0,53$ . Точку на кривой, соответствующую  $U_s$  обозначаем через  $O'$ . Значение  $\frac{U}{\omega I'}$  получим, откладывая вниз от  $O'$   $U = 40$  в.

Теперь для каждого значения  $x$ , откладывая  $U \left( \frac{2}{x} - 1 + \cos x \right)$  получаем соответствующие токи, и по формуле (19) определяем  $K_{\text{дн. ДН}}$ .

Начальную точку характеристики получаем откладывая  $U$  от точки  $O$ . Далее, перемещая этот вектор по оси ординат, находим точки, соответствующие новому положению вектора и  $2\Delta U$ , т. е.  $I_p(\tilde{U})$  и  $I_s = \frac{I(2\Delta U)}{2}$ . По полученным результатам построена кривая (рис. 6) и для сравнения в виде точек приводятся экспериментальные данные.

Автор выражает благодарность члену-корреспонденту АН АрмССР Г. Т. Адонцу за ценные замечания.

ИРФЭ АН Армянской ССР

Поступило 3.XI.1965

Է. Է. ՀՈՎԱՆՆԻՅԱՆ

ՀԱՎԵՑՈՐԱՆ ԴՐՈՍՍԵԼԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Ո

Հոդվածում բերվում է հաղեցման դրոսելի բնութագրի հաշվարկի մեթոդ, որը հիմնվում է դրոսման ամպիր-գալարների որոշման վրա: Գրողման ամպիր-գալարները, որոնք տեղի ունեն և ղեկավարման շղթայում և աշխատող շղթայում, որոշվում են միջուկի մագնիսային բնութագրի հատված-դժային ապրոկսիմացիայի միջոցով: Տրվում է ուժեղացման գործակցի անալիտիկ արտահայտությունը՝ որպես ֆունկցիա հաղեցման անկյունից, որոշման աստիճանից և հաղեցման դրոսել պարամետրերից:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Storm H. F. Magnetic Amplifiers, New York, Wiley, 1955.
2. Бессонов Л. А. Электрические цепи со сталью, Госэнергоиздат, 1918.
3. Chandler D. P., Downing R. W. Elimination of magnetic amplifier circuit Inductance. Communication and Electronics, 550—557 (November 1958).