

Э. А. ОГАНЕСЯН

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОССЕЛЕЙ НАСЫЩЕНИЯ С ПОДАВЛЕННЫМИ ЧЕТНЫМИ ГАРМОНИКАМИ ТОКА

Процессы в дросселях насыщения (ДН) с подавленными четными гармониками тока сильно отличаются от процессов в ДН со свободными четными гармониками тока и, что наиболее важно, уравнения потоков в этих ДН различны [1]. Рассмотрим ДН с последовательно соединенными рабочими обмотками, работающий на активную нагрузку (рис. 1). Цепь управления включена на источник тока. В

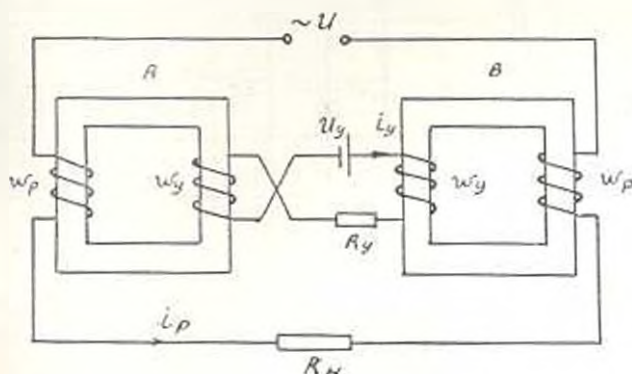


Рис. 1. Схема дросселя насыщения.

отличие от [2] здесь используем только уравнение магнитной цепи ненасыщенного дросселя, скажем В. Тогда, выражая ампервитки намагничивания через магнитный поток и магнитную проводимость сердечника, получим

$$I_p N_p = I_c N_c = \frac{\Phi_B}{0.4\pi G_{\text{ср}}}. \quad (1)$$

Значение ампервиток управления не зависит от трансформации напряжения от рабочих обмоток в обмотки управления и задается источником тока в цепи управления. Магнитный поток в сердечнике дросселя В для ДН с идеальной характеристикой сердечника равен [1]:

$$\Phi_B = \Phi_s - \Delta\Phi \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2)$$

где $\Delta\Phi$ — максимальное изменение тока в сердечнике, зависящее от приложенного к рабочей обмотке напряжения. В ДН с реальной магнитной характеристикой сердечника при малых токах управления маг-

нитные потоки не доходят до потока насыщения вследствие потерь в сердечнике на подмагничивание. В связи с чем можем записать

$$\Phi_a = \Phi_y - \Delta\Phi \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

где Φ_y — постоянная составляющая магнитного потока, зависящая от тока управления. Определение характеристики при малых токах управления для всех режимов работы ДП (т. е. при $R_{\text{мах}} = 0$ и $R_{\text{мах}} \neq 0$) остается одним и тем же, поэтому будет дано ниже после рассмотрения этих режимов. Для облегчения расчета аналогично [2] условно

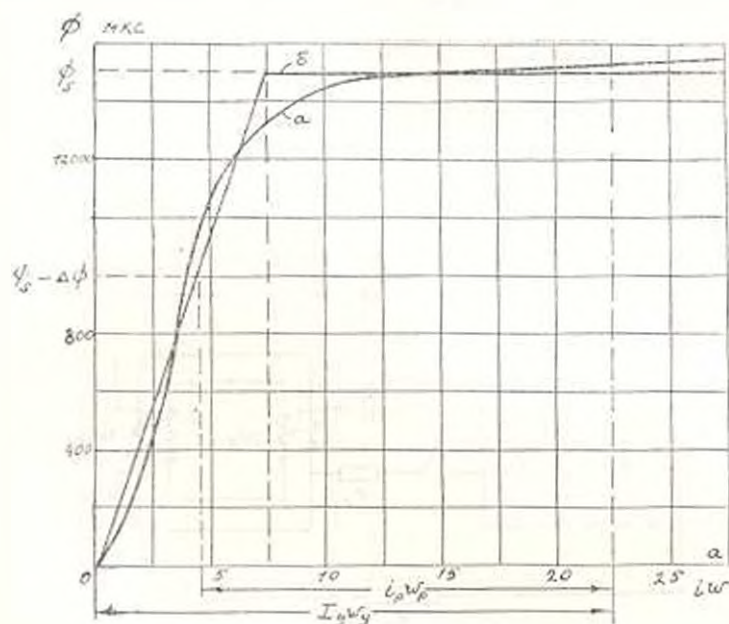


Рис. 2. Магнитные характеристики сердечника: а) — реальная, б) — аппроксимированная.

аппроксимируем кривую намагничивания сердечника двумя отрезками прямой (рис. 2). Совместное решение уравнений (1) и (2) дает значение рабочих ампервитков как

$$I_p \omega_p = I_y \omega_y - \frac{\Phi_y}{0,4 \cdot G_{m, B}} + \frac{\Delta\Phi \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}{0,4 \cdot G_{m, B}}$$

или, соответственно, так как при $R_{\text{мах}} = 0$ напряжение сети прикладывается к рабочей обмотке ненапряженного дросселя

$$I_p \omega_p = I_y \omega_y - \frac{\omega_p U_s}{\omega L} + \frac{\omega_p U_s \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}{\omega L}, \quad (4)$$

где $L = 0,4\pi \omega_p^2 G_{m, B} \cdot 10^{-8}$ — индуктивность рабочей обмотки одного дросселя; U_s — напряжение насыщения одного дросселя. Среднее по модулю значение рабочих ампервитков равно

$$I_p \omega_p = I_y \omega_y - \frac{\omega_p U_s}{\omega L} + \frac{\omega_p U}{\omega L} \quad (5)$$

Коэффициент усиления по ампервиткам

$$K_{\text{ЛВ, ДН}} = \frac{I_p \omega_p}{I_y \omega_y} \quad (6)$$

При конечном сопротивлении нагрузки существуют четыре режима работы ДН с идеальной характеристикой сердечника [3]. Эти режимы существуют и для ДН с реальной характеристикой намагничивания сердечника. Кроме этого, существует и режим при малых токах управления. Этот режим не разграничивается резко от первого режима, однако, как и в [2], характеристика ДН при малых токах управления требует отдельного решения.

Первый режим работы ДН. Если пренебречь падением напряжения от токов возбуждения, то

$$I_p \approx I_y - I_y \frac{\omega_p}{\omega_p}$$

Тогда рабочие ампервитки (рис. 3а) будут

$$I_p \omega_p = I_y \omega_y - \frac{\omega_p U_s}{\omega L} + \frac{\omega_p [U_m \sin(\omega t - \alpha) - I_y R_{\text{ВМХ}}]}{\omega L} \quad (7)$$

Среднее по модулю значение рабочих ампервитков

$$I_p \omega_p = I_y \omega_y - \frac{\omega_p U_s}{\omega L} + \frac{\omega_p (U - I_y R_{\text{ВМХ}})}{\omega L} \quad (8)$$

Первый режим работы ДН при конечной нагрузке имеет место до некоторого значения угла α [1]. Значение этого угла

$$\alpha = \arccos \frac{I_y R_{\text{ВМХ}}}{U} \quad (9)$$

Первый режим ограничивается значением $\alpha = \nu = 32,5^\circ$ ($\cos \nu = 0,844$) при значениях $\alpha < \nu$ начинается второй режим работы ДН (рис. 3б)

Второй режим работы ДН. Для второго режима работы ДН проще написать сразу выражение для средних значений ампервитков. При этом для расчета ампервитков возбуждения делаем допущение, что среднему значению магнитного потока, независимо от формы приложенного напряжения, соответствует определенное среднее значение ампервитков. Это справедливо не только для аппроксимированной магнитной характеристики, но и приближенно для реальной магнитной характеристики. Ошибку, вносимую при этом, учитываем выбором нового начала координат на кривой намагничивания [2]. Получаем следующее выражение средних рабочих ампервитков:

$$I_p \omega_p = I_y \omega_y - \frac{\omega_p U_s}{\omega L} + \frac{\omega_p (U - I_y R_{\text{ВМХ}})}{\omega L}$$

$$-\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left(I_y \omega_y - \frac{\omega_p U}{R_{\text{нмк}}} \sin \omega t \right) d(\omega t). \quad (10)$$

Угол γ определяется из следующего уравнения:

$$\gamma = \arcsin \frac{I_y R_{\text{нмк}}}{U_m}. \quad (11)$$

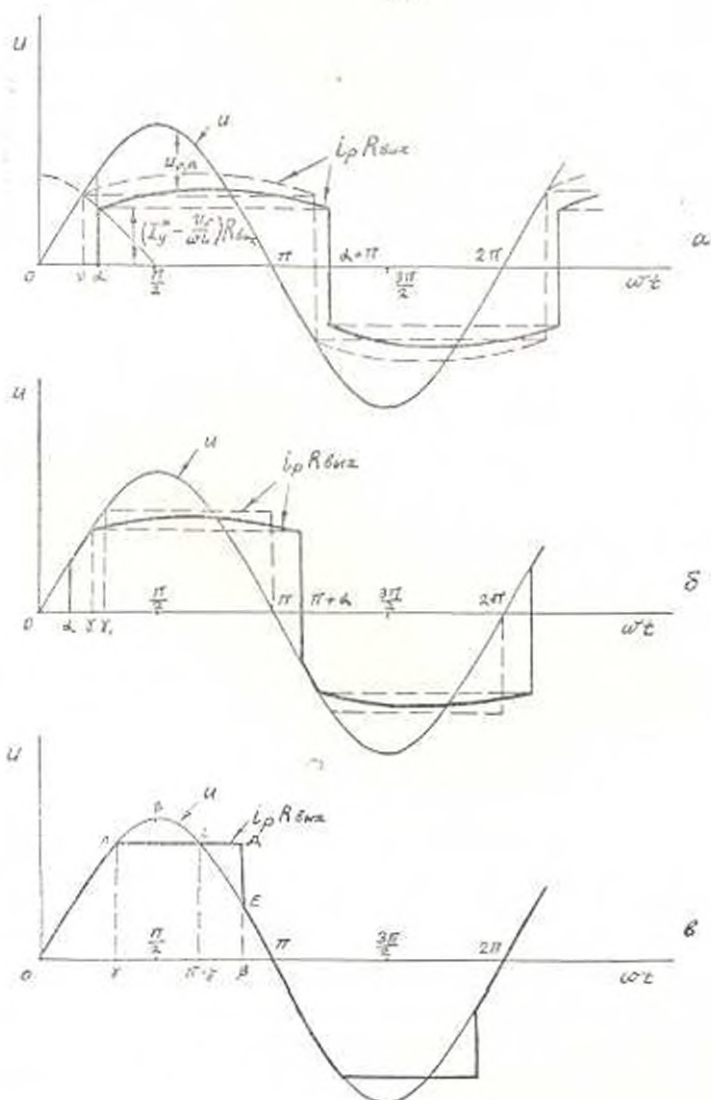


Рис. 3. Напряжение питания и выходное напряжение на нагрузке при: а) первом режиме, б) втором режиме, в) — третьем режиме.

Решая уравнение (10) относительно рабочих ампервитков, получаем трансцендентное уравнение

$$I_p \omega_p = \frac{b}{a} + \frac{I_y \omega_y}{\pi} \arccos \frac{I_p R_{\text{нмк}}}{U}. \quad (12)$$

где

$$a = \frac{1}{2} + \frac{R_{\text{max}}}{\omega L};$$

$$b = I_y \omega_y \left(1 - \frac{\gamma}{\pi}\right) - \frac{\omega_p U_s}{\omega L} + \frac{\omega_p U}{\omega L} - \frac{\omega_p U}{2R_{\text{max}}} \cos \gamma.$$

Существуют довольно простые методы приближенного решения трансцендентных уравнений с какой угодно степенью точности. Нам необходимо для каждого значения $I_y \omega_y$ определять $I_p \omega_p$ как корень уравнения (12). Второй режим работы имеет место при $0 < \alpha < \gamma$ или для относительного тока управления $0,844 < I_y < 1,14$ [1]. При $I_y > 1,14$ начинается третий режим работы ДН (рис. 3в).

Третий режим работы ДН. При третьем режиме для ДН с реальной магнитной характеристикой сердечника при полном насыщении сердечников ($\Delta\Phi = 0$) мгновенное значение рабочего тока i_p из-за существования наклонной части магнитной характеристики и в интервале АД будет меньше I_p на $\frac{U_s}{\omega L}$ (рис. 2).

Для облегчения определения интервала АД считаем, что магнитопровод ДН идеальный. Тогда из равенства площади $ABC = CDE$ [4]

$$\int_1^{\pi-\gamma} \left(\frac{U_m}{R_{\text{max}}} \sin \omega t - I_y \right) d(\omega t) = \int_\beta^{\gamma} \left(I_y - \frac{U_m}{R_{\text{max}}} \sin \omega t \right) d(\omega t). \quad (13)$$

Решая эти интегралы, получим трансцендентное уравнение

$$\beta = -\frac{U_s}{I_y R_{\text{max}}} \cos \gamma + \pi - \gamma - \frac{U_m}{I_y R_{\text{max}}} \cos \beta. \quad (14)$$

Интервал АД обозначим через

$$\alpha = \pi - \gamma - \beta. \quad (15)$$

Рабочие ампервитки будут для ДН с реальным магнитопроводом

$$I_p \omega_p = \frac{2}{\pi} I_y \omega_y - \frac{\omega_p U_s}{\omega L} + \frac{\pi - \gamma - \beta}{\pi}. \quad (16)$$

Откуда видно, что только в конце третьего режима, т. е. когда $I_y = \frac{\pi}{2}$, относительное значение рабочего тока $i_p = 1$. При токе управления больше $I_y = \frac{\pi}{2}$ начинается четвертый режим.

Четвертый режим работы ДН. Четвертый режим ДН с реальной магнитной характеристикой сердечника не отличается от того же режима ДН с идеальной магнитной характеристикой сердечника, так как при $I_y > \frac{\pi}{2}$ ДН работает так, как если бы в дросселе не было железа (рис. 4). Ток нагрузки синусоидален и не меняется при увеличении I_y .

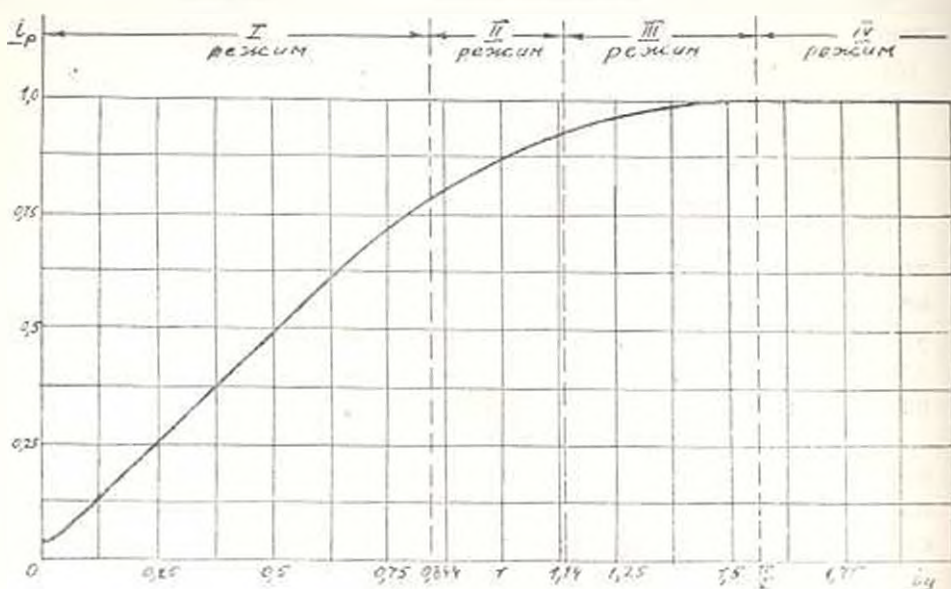


Рис. 4. Характеристика дросселя насыщения.

Примечание: При отсутствии тока управления при нормальном возбуждении и недо возбуждении ДИ сердечники дросселей не насыщены, через рабочую обмотку [2] течет ток возбуждения

$$i_{p,0} = \frac{\Phi_{\Delta} - \Phi_0}{2\omega_p G_m} \quad (17)$$

где G_m — магнитная проводимость ненасыщенного сердечника.

При определении непосредственно значений ампервитков будем пользоваться реальной характеристикой намагничивания. Среднее значение тока возбуждения $I_{p,0}$ при нулевом токе управления определяется по кривой намагничивания или вольтамперной характеристике одного дросселя (рис. 5) как полусумма токов, соответствующих напряжениям $U_{p, \Delta}$ и $U_{p, B}$, отложенным от точки 0 вверх и вниз. При протекании в обмотке управления малого тока управления I_u , магнитные потоки смещаются вверх на Φ_u , соответствующий току управления I_u , на магнитной кривой. Напряжения $U_{p, \Delta}$ и $U_{p, B}$ откладываются теперь от точки O_1 . Если $U_{p, \Delta}$ переходит за U_{Δ} , то ΔU откладывается вниз от конца $U_{p, B}$. Ток возбуждения в этом случае равен половине тока соответствующего напряжению от U_{Δ} до конца $U_{p, B}$ плюс ток ΔI , соответствующий напряжению ΔU . Символически можно записать так

$$I_p = \frac{1}{2} I [(U_{\Delta, \Delta} - \Delta U) + U_{p, B}] + I (\Delta U). \quad (18)$$

Ток возбуждения определяется до значения приведенного тока управления $I_p = \frac{U_{\Delta}}{\omega L}$, при больших I_u начинается первый режим работы ДИ.

графоаналитическим, так как корни трансцендентных уравнений определяются графически и графо-аналитически.

Автор выражает благодарность проф. Г. Т. Адовцу за ценные советы и замечания.

ИРФЭ АН АрмССР

Поступила 22.IV.1966

Է. Լ. ՕԳԱՆՅԱՆԻՆ

ՀԱՍՈՒՆՔԻ ԶՈՒՅԳ ՀԱՐՄՈՆԻԿԱՆԵՐԸ ՀԵՇՎԱԾ ՀԱԳԵՑՄԱՆ ԴՐՈՍՈՒՄՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԻ ՀԱՇՎԱԲԵՐ

Ա. Մ. Փ. և Փ. Ն. Ի. Մ.

Տրվում է հոսանքի շարժման հարմանիկաները հնչված հազեցման դրոսեկների բնութագրի հաշվարկի մեթոդ՝ օգտագործելով միջուկի մազեխական բնութագրի կառուցման մեթոդները: Հաշվարկը կատարվում է քննարկածի ոչ-լիներային դիմադրություն ունեցող հազեցման դրոսեկի շարժման բնութագրի և հոսանքի լիներային դիմադրություն ունեցող հազեցման դրոսեկների համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Сторч Г. Ф. Магнитные усилители. М., 1957.
2. Оганян Э. Л. Расчет характеристики дросселя насыщения. Известия АН АрмССР (серия ТН), № 2, 1966.
3. Storm H. F. Trans. ATEE, 69, Part. II, 1299-1309 (1950).
1. Бессонов Л. А. Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, 1918.