

РАСЧЕТ ТОКОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТНОГО
УСИЛИТЕЛЯ С САМОНАСЫЩЕНИЕМ ПРИ РАБОТЕ
НА ПРОТИВО-Э.Д.С.

При расчете электроприводов с магнитными усилителями (МУ) необходимо учитывать влияние токов намагничивания. Рассмотрим метод расчета при работе МУ на противо-э.д.с. (рис. 1). При условии, что динамические кривые размагничивания (ДКР) аппроксимированы отрезками трех прямых, режим намагничивания дросселей - вынужденный, вентили идеальны, потоки рассеяния отсутствуют.

На рис. 2 приведены диаграммы линейных U_l и фазных U_ϕ напряжений и индукции B в дросселях при

$$E_o > U_m \sin \frac{\pi}{3},$$

где E_o - противо-э.д.с. холостого хода; U_m - максимальное напряжение.

При $E_o > U_l$ вентили Д1 - Д6 заперты и индукция в сердечниках устанавливается под действием намагничивающей силы (НС) управления. В момент γ_1 дроссель В1 попадает в интервал возбуждения и под действием напряжения $U_{BC} - E$ по цепи В-Д3-Р-Н-Д6-С течет ток намагничивания, изменяя индукцию от B_o до B_s . Потенциал точки Н $V_H = U_C$, $V_P = V_H + E$. Соответственно $V_B > V_A < V_P > V_C$, вентили Д1, Д2, Д4, Д5 заперты, а дроссели А1, А2, В2, С1 находятся в интервале управления. Вентиль Д6 открыт и через обмотку насыщенного дросселя С2 протекает ток намагничивания В1.

В интервале $\pi - \gamma_1 < \gamma < \frac{\pi}{3} + \gamma_1$ $E_o > U_l$ и все сердечники дросселей размагничиваются НС управления. Для упрощения положим, что индукция сердечников в этом интервале не изменяется. Тогда каждый дроссель последовательно проходит

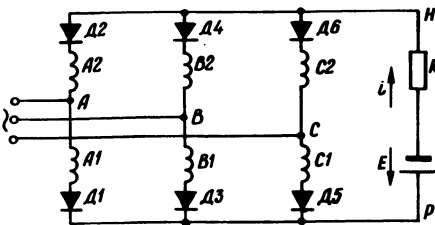


Рис. 1. Принципиальная схема мостового магнитного усилителя, работающего на противо-э.д.с.

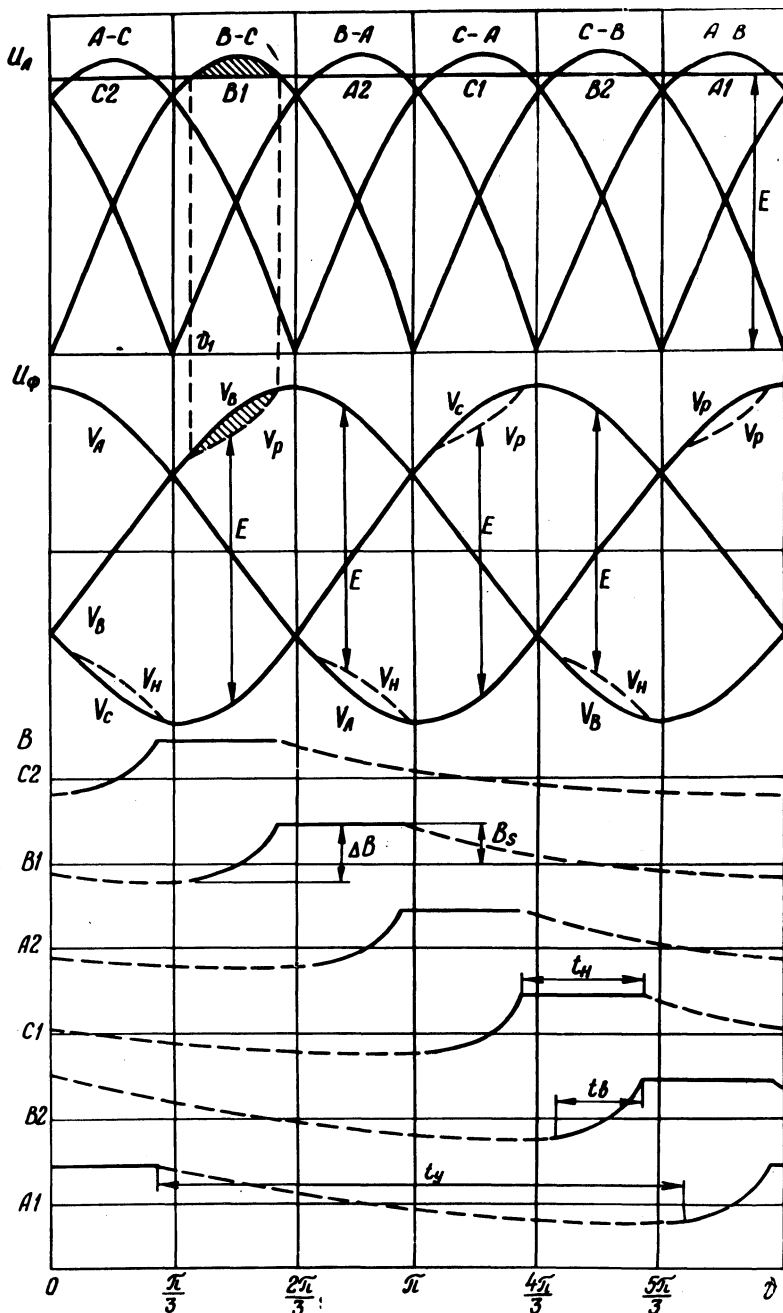


Рис.2 Изменение напряжения на обмотках и индукции в сердечниках при работе на противо-э.д.с. от 0,86 до 1 при холостом ходе.

состояние возбуждения за время t_B , насыщения за t_H и управления за t_y .

Для интервала возбуждения дросселя В1 в соответствии с законом Кирхгофа

$$V_B - V_{др} - E - V_C = 0$$

или

$$\omega W_p S \frac{dB}{d\vartheta} = U_M \sin \vartheta - E, \quad (1)$$

где $U_{др}$ - напряжение, приложенное к обмотке; ω - угловая частота напряжения сети; W - число витков рабочей обмотки; S - сечение сердечника дросселя.

Изменение индукции в сердечнике дросселя в интервале возбуждения (пропорциональное площади, заштрихованной на рис.2):

$$\Delta B = \frac{1}{\omega W_p S} \int_{\vartheta_1}^{\pi - \vartheta_1} (U_M \sin \vartheta - E) d\vartheta = \frac{U_M}{\omega W_p S} \left[2 \cos \vartheta_1 - (\pi - 2 \vartheta_1) \sin \vartheta_1 \right]. \quad (2)$$

Полагая, что при нормальном возбуждении МУ амплитуда напряжения сети соответствует максимальной индукции $B_M =$

$B_S = \frac{U_M}{2\omega W_p S}$, получим относительное изменение индукции в сердечниках

$$\beta = \frac{\Delta B}{2B_S} = 2 \cos \vartheta_1 (\pi - 2 \vartheta_1) \sin \vartheta_1 \quad (3)$$

или

$$\beta = 2 \cos(\arcsin \varepsilon_0) - \varepsilon_0 (\pi - 2 \arcsin \varepsilon_0), \quad (4)$$

где

$$\vartheta_1 = \arcsin \varepsilon_0, \quad \varepsilon_0 = E_0 / U_M.$$

Напряженность поля, соответствующая ширине динамической петли гистерезиса H_d , создается двумя токами с противоположно направленными НС - намагничивающим током рабочей обмотки дросселя $i_{\mu p}$ и током управления i_y . По закону полного тока

$$H_d = \sum \frac{1}{l} i W = \frac{1}{l} (i_{\mu p} W_p - i_y W_y). \quad (5)$$

Учитывая, что напряженность поля управления

$$H_y = \frac{1}{l} i_y W_y = H_d, \quad (6)$$

для интервала возбуждения получим

$$i_{\mu p} = \frac{2l}{W_p} H_d. \quad (7)$$

В интервале насыщения скорость изменения потока равна нулю и сердечник может перемагничиваться по статической петле гистерезиса. Так как в этом случае суммарная напряженность поля в сердечнике уменьшается от H_d до коэрцитивной силы H_c , уравнение НС насыщенного сердечника имеет вид

$$i'_{\mu p} W_p - i_y W_y = -H_c l, \quad (8)$$

где $i'_{\mu p}$ — намагничивающий ток в интервале насыщения,

$$i'_{\mu p} = \frac{l}{W_p} (H_d - H_c). \quad (9)$$

Средний ток намагничивания (рис. 2)

$$I_{\mu 0} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi-\vartheta_1} i'_{\mu p} d\vartheta + \frac{3}{\pi} \int_{\vartheta_1}^{\pi-\vartheta_1} i_{\mu p} d\vartheta + \frac{3}{\pi} \int_{\pi-\vartheta_1}^{\frac{2\pi}{3}} i'_{\mu p} d\vartheta. \quad (10)$$

Интегрируя (10) и выражая углы через противо-э.д.с. в диапазоне $1 > \varepsilon_0 > 0,866$, найдем

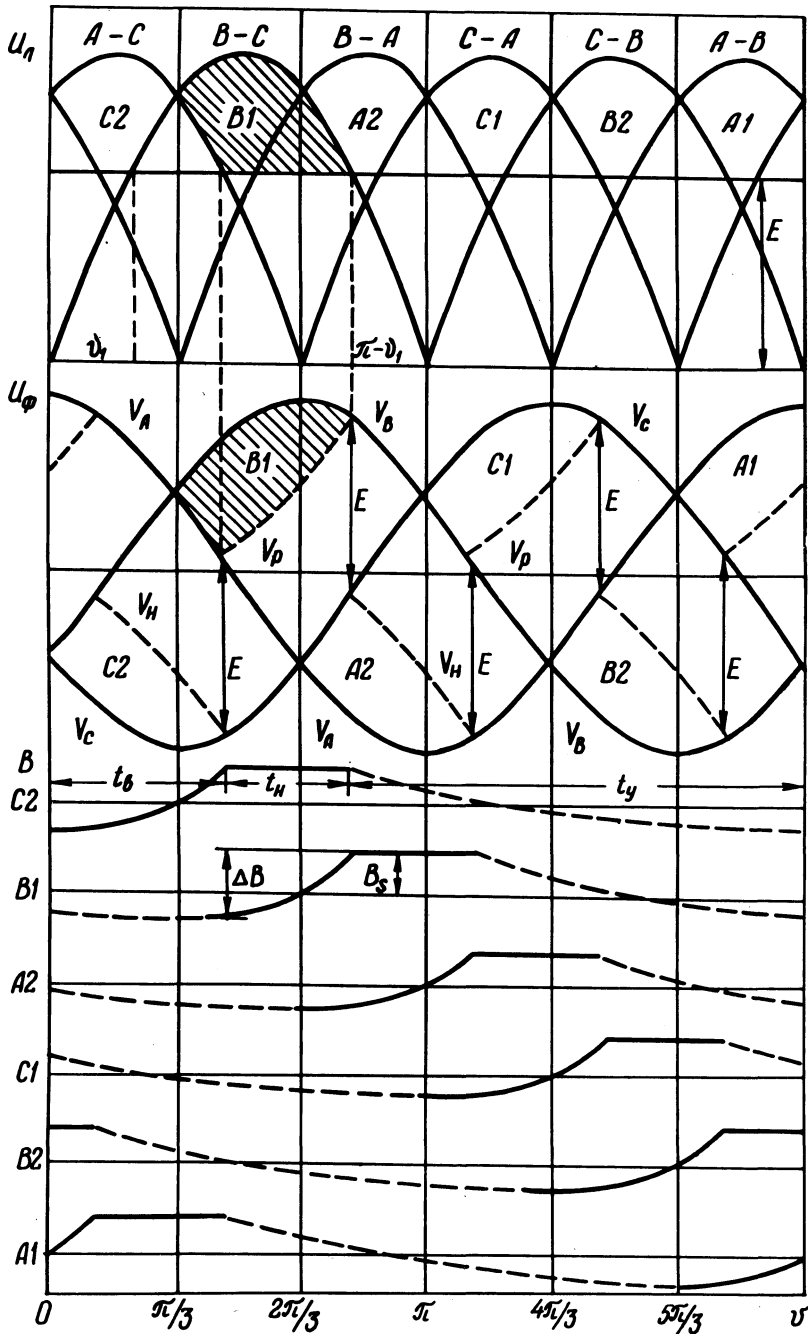
$$I_{\mu 0} \approx \frac{l}{W_p} [3,82 H_d (1,83 - \arcsin \varepsilon_0) - H_c]. \quad (11)$$

Минимальный средний ток намагничивания (при $\varepsilon_0 = 1$, $\vartheta = \frac{\pi}{2}$)

$$I_{\mu \text{ мин}} = \frac{l}{W_p} (H_d - H_c). \quad (12)$$

Максимальное значение (при $\varepsilon_0 = 0,866$, $\vartheta_1 = \frac{\pi}{3}$)

$$I_{\mu \text{ макс}} = \frac{l}{W_p} (3H_d - H_c). \quad (13)$$



На рис. 3 показаны диаграммы напряжений и индукции в сердечниках МУ, работающего в режиме холостого хода при $\epsilon < 0,86$. Дроссель В1 начинает насыщаться с момента естественной коммутации при $\gamma = \frac{\pi}{3}$. Однако ток намагничивания теперь не может протекать под действием напряжения $U_{BC} - E$, так как дроссель С2 не насыщен. В то же время А1 еще насыщен, потенциал $V_A = V_P$ и Д1 открыт. Поэтому намагничивающий ток протекает по цепи В-В1-Д3-Д1-А1-А и дроссель В1 возбуждается под действием напряжения U_{BA} . При $\gamma = \frac{2\pi}{3} - \gamma_1$ С2 достигает насыщения. В дальнейшем $E > U_{AC}$ и Ventиль Д1 заперт. Теперь намагничивающий ток В1 может протекать только под действием напряжения $U_{BC} - E$ через нагрузку и насыщенный дроссель С2. Начиная с $\gamma = 2\pi/3$, дроссель А2 насыщается под действием U_{AC} . Так как Д6 открыт, ток намагничивания дросселя А2 течет по цепи С-С2-Д6-Д2-А2-А. Таким образом, при $\epsilon < \sin \frac{\pi}{3}$ существуют участки, когда два дросселя находятся в интервале возбуждения, три - в интервале управления, один насыщен.

Перепад индукции в сердечнике дросселя В1 (рис. 3)

$$\Delta B = \frac{U_M}{\omega W_p S} \left[\int_0^{2\pi/3 - \gamma_1} \sin \gamma d\gamma + \int_{\frac{2\pi}{3} - \gamma_1}^{\pi - \gamma_1} (\sin \gamma - \epsilon_0) d\gamma \right] = \frac{U_M}{\omega W_p S} \left(1 - \frac{\pi}{3} \sin \gamma_1 \right). \quad (14)$$

Относительное изменение индукции

$$\beta = 1 - \frac{\pi}{3} \sin \gamma_1. \quad (15)$$

Для $0 \leq \epsilon_0 \leq 0,866$ находим

$$\epsilon_0 = \frac{3}{\pi} (1 - \beta). \quad (16)$$

Величину $I_{\mu 0}$ определим, учитывая, что в интервале $\frac{\pi}{3} \leq \gamma \leq \frac{2\pi}{3} - \gamma_1$ ток намагничивания одного из дросселей (В1)

Рис. 3. Диаграмма изменения напряжений и индукции в диапазоне изменения противо-э.д.с. от 0 до 0,86 при холостом ходе.

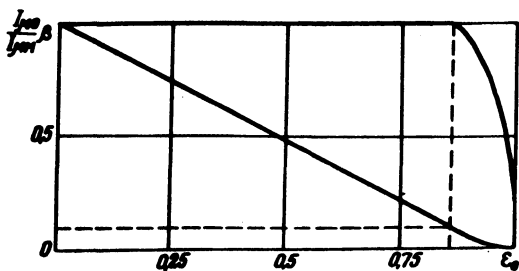


Рис. 4. Зависимость относительного изменения индукции и тока намагничивания магнитного усилителя от противо—э.д.с. холостого хода.

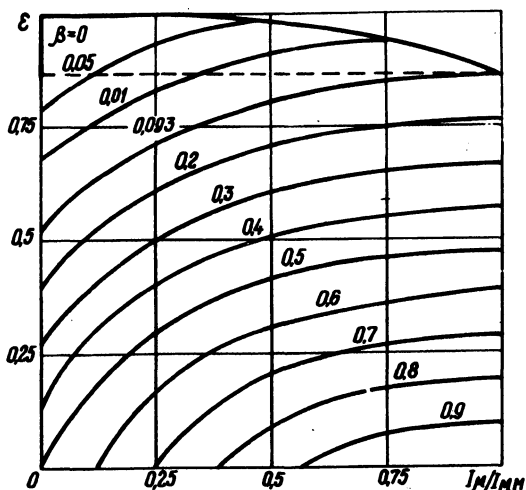


Рис. 5. Зависимость тока намагничивания магнитного усилителя от противо—э.д.с. при работе под нагрузкой.

протекает в запирающем направлении, минуя нагрузку:

$$I_{\mu_0} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi-\frac{\pi}{3}} i_{\mu p} d\gamma - \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{2\pi/3-\frac{\pi}{3}} i_{\mu p} d\gamma + \frac{3}{\pi} \int_{\frac{2\pi}{3}-\frac{\pi}{3}}^{2\pi-\frac{\pi}{3}} i_{\mu p} d\gamma + \frac{3}{\pi} \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}-\frac{\pi}{3}} i_{\mu p} d\gamma. \quad (17)$$

Учитывая (7) и (9), получим

$$I_{\mu_0} = \frac{1}{W_p} (3N_d - N_c). \quad (18)$$

На рис. 4 показана зависимость $I_{\mu_0} / I_{\mu_0} = (\epsilon_0)$ и $\epsilon_0(\beta)$ для $N_c = 0,5N_d$. Величина максимального $\mu_{\text{магнитного}}$

тока принята за единицу, при этом $I_{\mu \text{ мин}} = 0,2$. В расчете не учитывалось запирающее действие противо-э.д.с., когда последняя превышает линейные напряжения.

На рис. 5 приведена зависимость относительного тока намагничивания $i_{\mu} = I_{\mu} / I_{\mu \text{ м}}$ от противо-э.д.с. при $\beta = \text{const}$.

Значения $I_{\mu 0}$ при холостом ходе приняты в соответствии с рис. 4 при $N_c = 0,5 N_d$. Полный ток нагрузки

$$i_{\text{ ср}} = i_{\mu} + i_s, \quad (19)$$

где $i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{\text{ м}}}$. Здесь $I_{\text{ м}}$ - максимальный ток нагрузки.

Определив величину $I_{\mu \text{ м}}$, можно найти (рис. 5) средний ток нагрузки в соответствии с (19) для каждой характеристики при $\beta = \text{const}$.

И.Ф. Кузьмицкий, П.В. Ползик

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ОДНОГО КЛАССА ОБЪЕКТОВ

Рассматривается синтез системы управления электроприводом постоянного тока, используемым для стабилизации режима работы стационарного объекта.

Движение как электропривода, так и объекта описывается линейными дифференциальными уравнениями второго порядка, которые представим в виде системы уравнений в нормальной форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= a_{12} X_2, \\ \dot{X}_2 &= a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + b_{22} U, \\ \dot{X}_3 &= a_{34} X_4, \\ \dot{X}_4 &= a_{41} X_1 + a_{43} X_3 + a_{44} X_4, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$