Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 1968 г.

УДК 622.625.28—83

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИКИ «ВХОД — ВЫХОД» СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА С МАГНИТНЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

К. А. Ананьев, А. В. Рысеев, И. М. Столяров

Результатом исследований * рудничной электровозной откатки на переменном токе явилась схема с применением силовых магнитных усилителей (рис. 1), при которой усилитель может управляться как машинистом, так и автоматически — электрическими сигналами. Тяговые двигатели электровоза питаются от контактной сети переменного тока через магнитный усилитель с магнитным ключом с выходом на постоянном токе. Магнитный усилитель ** состоит из двух дросселей, намотанных на тороидальные сердечники: один дроссель $С$ — силовой, второй $У$ — управляющий. Часть силовой обмотки дросселя $С$ ($ах$) через вентиль $Д_У$ замкнута на дроссель $У$. Выходное напряжение магнитного усилителя регулируется переменным сопротивлением $R_У$, шунтирующим вентиль $Д_У$.

В установившемся режиме схема может быть описана системой

$$\begin{cases} U_н = f(R_У), & (1) \\ n = \dfrac{U_н}{c'_e I} - \dfrac{\sum R_я}{c'_e}, & (2) \\ M_д = c'_м I^2 \\ M_д = M_с, & (3) \end{cases}$$

где $U_н$ — среднее значение напряжения на нагрузке; n — скорость вращения двигателя; $c'_м$; $c'_е$ — машинные постоянные, определяемые параметрами двигателя и его обмоточными данными; I — ток тягового двигателя; $\sum R_я$ — суммарное сопротивление якорной цепи тягового двигателя; $M_д$ — момент, развиваемый двигателем; $M_с$ — момент сопротивления движению.

Под характеристикой «вход—выход» будем понимать зависимость $n = F(R_У)$ и, чтобы определить $U_н = F(R_У)$, рассмотрим эквивалентную схему, приведенную на рис. 2.

Пусть $R_У$ равно какой-то конечной величине, не равной нулю. Напряжение сети

$$u = U_m \sin \omega t,$$

где U_m — амплитудное значение напряжения сети; ω — круговая частота; t — время.

Пусть вентиль $Д_У$ включен относительно напряжения сети так, что на интервалах $2k\pi$ и $(2k + 1)\pi$ он является проводящим, на интервалах $(2k+1)\pi$ и $(2k + 2)\pi$ — запирающим. Напряжение на нагрузке $R_н$ в k-м полупери-

* Работы проводились кафедрой электротехники и электрических машин Ленинградского горного института в 1964—1966 г.

** Столяров И. М. Магнитные усилители с полупроводниковыми и магнитными ключами. Энергия, 1965.

оде — проводящем для вентиля $Д_У$ — будет определяться размагничиванием дросселя $У$ в $(k-1)$-м полупериоде — запирающем для вентиля $Д_У$. Так как рассмотрены условия установившегося режима, это положение будет справедливо и для всех последующих полупериодов.

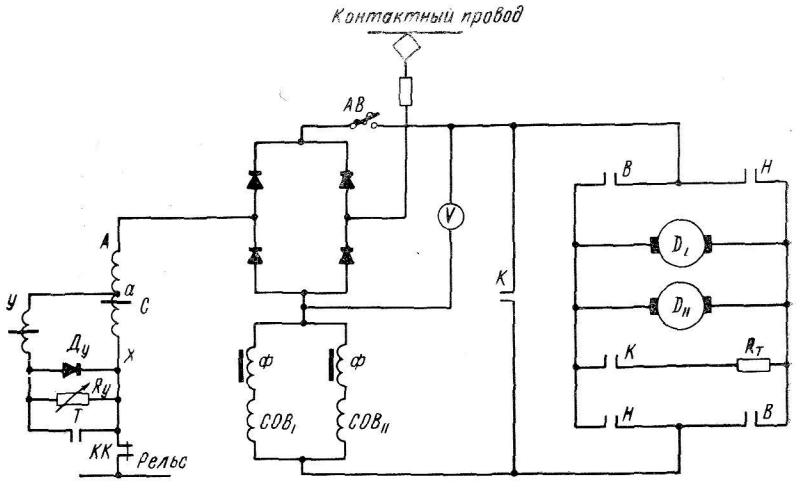


Рис. 1. Схема привода электровоза переменного тока с силовыми магнитными усилителями.

Итак, можно записать следующие соотношения:

$$U_н = U_{ср} - 2fw_C S_C |\Delta B_C|;$$

$$|\Delta B_C| = m|\Delta B_Y|; \tag{4}$$

$$m = \frac{w_Y S_Y}{w_{ax} S_C}; \quad -B_s \leqslant \Delta B_C \leqslant +B_s, \tag{5}$$

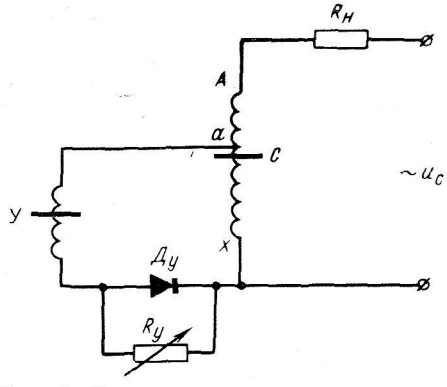


Рис. 2. Эквивалентная схема электровоза переменного тока.

где ΔB_C, ΔB_Y — приращение индукции в сердечнике дросселей $С$ и $У$; $U_{ср}$ — среднее значение напряжения сети; B_s — индукция насыщения; f — частота сети; w_{ax}, w_Y, w_C — число витков соответственно сердечника $С$ на участке ax, сердечника $У$, силового дросселя; S_C, S_Y — сечения сердечников $С$ и $У$.

Параметры схемы выбираются так, чтобы при $|\Delta B_C| = 2B_s$, напряжение $U_н = 0$.

Размагничивание сердечника дросселя $У$ в $(2K+1)\pi$; $(2K+2)\pi$ полупериодах можно определить из уравнения

$$u_{ax} = i_μ R_Y + w_Y S_Y \frac{dB_Y}{dt}, \tag{6}$$

где $u_{ax} = -u_{ax_{max}} \sin \omega t$; $i_μ$ — ток намагничивания.

Уравнения (4), (5), (6) определяют собой искомую функцию: $U_н = F(R_Y)$.

Величина и фаза тока намагничивания $i_μ$ зависят от напряжения и так называемой магнитной истории сердечника дросселя $У$, т. е. не только от

индукции сердечника дросселя в каждый рассматриваемый момент, но и от его предыдущего магнитного состояния. Точное определение этой зависимости весьма сложно. Известно, что при высокой степени прямоугольности кривой намагничивания сердечника $У$ этот ток близок определяемому коэрцитивной силой сердечника. С достаточной степенью точности можно считать, что $i_у$ = = const в течение управляющего полупериода.

Тогда из уравнения (6) можно определить изменение индукции в k-м размагничивающем полупериоде. При интегрировании этого уравнения необходимо учесть, что размагничивающее напряжение действует на интервале $[(2k+1)\pi;\ (2k+1)\pi+\theta_s]$.

$$|\Delta B_Y| = \frac{1}{w_Y S_Y}\int_{\pi}^{\Theta_s}(u_{ax} - I_{CY}R_Y)\,d(\omega t), \tag{7}$$

$$\pi \leqslant \Theta_s \leqslant 2\pi,\ k=0^*.$$

Угол насыщения сердечника дросселя C θ_s в свою очередь является функцией изменения индукции и может быть найден в предположении, что ΔB_C за полупериод известна. Тогда

$$|\Delta B_C| = \frac{1}{\omega w_C S_C}\int_{\pi}^{\Theta_s} U_m \sin\omega t\, d(\omega t) = \frac{U_m}{\omega w_C S_C}(-\cos\Theta_s - 1). \tag{8}$$

$$\pi \leqslant \Theta_s \leqslant 2\pi.$$

Параметры сердечника дросселя C выбраны так, что

$$U_m = \omega w_C S_C B_s.$$

Обозначим отношение

$$\frac{\Delta B_C \omega w_C S_C}{U_m} = \frac{\Delta B_C}{B_s} = \xi. \tag{9}$$

Тогда из уравнения (8) находим

$$|\xi| = |-\cos\Theta_s - 1| \tag{10}$$

или

$$\cos\Theta_s = -(1-\xi);\quad \pi \leqslant \Theta_s \leqslant 2\pi;\quad 0 \leqslant \xi \leqslant 2.$$

На основании уравнений (7) и (10) получаем:

$$\Delta B_Y = \frac{\pi}{\omega w_Y S_Y}\left[u_{ax}(1+\cos\Theta_s) - I_{CY}R_Y\left(\frac{\Theta_s}{\pi} - 1\right)\right],$$

$$\Theta_s = \arccos(1-\xi) + \pi, \tag{11}$$

$$\xi = \frac{\Delta B_C}{B_s} = \frac{m\,\Delta B_Y}{B_s},$$

где u_{ax} — среднее значение.

Система (11) определяет изменение $\Delta B_C = F(R_Y)$ и вместе с уравнением (4) определяет функцию $U_п = F(R_Y)$. Точное решение этой системы довольно сложно и громоздко.

Можно получить приближенное решение системы (11), если положить $\cos\theta_s = 1$. Это решение будет приемлемо для начального участка исследуемой характеристики. При изменении θ_s от 0 до $0{,}15\pi$ погрешность решения не превысит 10%.

---

* Это условие не нарушает общности рассуждения.

Итак, при $\cos\theta_s = 1$ и $\theta_s = 2\pi$ изменение индукции ΔB_Y запишется в форме:

$$\Delta B_Y = \frac{1}{2fw_Y S_Y}\left(u_{ax} - I_{CY}R_Y\right), \tag{12}$$

где I_{CY} — ток, определяемый коэрцитивной силой дросселя $У$.

Подставив значение (12) в формулу (4) и учитывая значение (5), получим

$$U_н = U_{ср} - \frac{w_{AX}}{w_{ax}}\left(u_{ax} - I_{CY}R_Y\right). \tag{13}$$

Эта зависимость дает удовлетворительное совпадение с данными опыта в начальной части характеристики $U_н = F(R_Y)$. При $U_н > \frac{2}{3}U_{ср}$ погрешность становится значительной. Величина погрешности во многом определяется качеством материала сердечника.

Подставив значение (13) в формулу (2), после некоторого упрощения получим

$$n = \frac{w_{AX}I_{CY}}{w_{ax}c'_e I}R_Y - \frac{\sum R_я}{c'_e}, \tag{14}$$

где w_{AX}, w_{ax} — число витков секций AX и ax дросселя $С$.

Итак, пока справедливо соотношение (13), обороты тягового двигателя линейно зависят от R_Y.

Учитывая, что

$$u_{ax_{ср}} \approx U_{ср}\frac{w_{ax}}{w_{AX}},$$

выражение (13) можно записать в виде

$$U_н = I_{CY}\frac{w_{ax}}{w_C}R_Y,$$

но

$$I_{CY} = \frac{H_{CY}l_Y}{w_Y},$$

где H_{CY} — коэрцитивная сила сердечника дросселя $У$, l_Y — длина средней силовой магнитной линии сердечника дросселя $У$.

Окончательно находим

$$U_н \approx \frac{H_{CY}l_Y w_{ax}}{w_C w_Y}. \tag{15}$$

В результате подстановки значений (15) в формулу (2) получим

$$n = \frac{H_{CY}l_Y w_{ax}}{w_C w_Y c'_e}R_Y - \frac{\sum R_я}{c'_e}. \tag{16}$$

Полученной формулой (16) можно пользоваться при ориентировочных расчетах. При изменении n от 0 до $0{,}5\,n_{ном}$ она дает удовлетворительное совпадение с данными опыта.

Итак, схема, построенная на магнитном усилителе с магнитным ключом, обеспечивает регулирование скорости привода в заданных пределах. Характеристику «вход — выход» можно описать системой уравнений (2), (4), (11) или приближенно — уравнением (16).