

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В РЕЛЕЙНОЙ САР ТОКА ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ СКАЧКЕ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

Л. В. ВОЛЫНЕЦ, А. П. ЗАЙЦЕВ.

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ при ТПИ)

Рассмотрим случай внезапного исчезновения напряжения питающей сети с его последующим восстановлением при регулировании пускового тока тягового двигателя шунтированием тиристорным ключом ступени пускового сопротивления. Предположим, что такое нарушение возникает в начале регулирования на очередной ступени. Уравнения, характеризующие этот процесс, должны быть представлены в полных координатах, которые изменяются в значительных пределах.

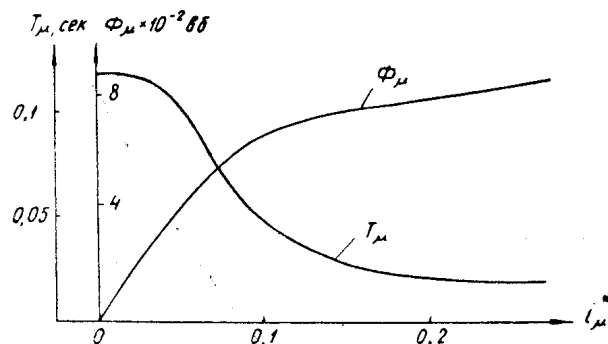


Рис. 1

Характеристика намагничивания двигателя последовательного возбуждения нелинейна; это обуславливает нелинейную зависимость индуктивности L_{μ} , а следовательно, и постоянной времени T_{μ} намагничивающего контура от тока i_{μ} . Метод фазовой плоскости позволяет исследовать характер изменения регулируемой величины и в том случае, если нелинейности $\Phi_{\mu}(i_{\mu})$ и $T_{\mu}(i_{\mu})$ заданы графически. Построение фазовой траектории в координатах $\left(i, \frac{di}{dt}\right)$ затруднительно, так как

для учета вышеуказанных нелинейностей необходимо знать значения намагничивающего тока i_{μ} , соответствующие мгновенным значениям тока якоря i . Целесообразно применить своеобразную фазовую плоскость с координатами (i_{μ}, \dot{i}_{μ}) , для чего представим системы уравнений, описывающих этот режим в виде:

$$\left. \begin{aligned} T_s \frac{di}{dt} + i + k_s (i - i_\mu) + c_e \omega \Phi_\mu (i_\mu) &= U_c \\ T_\mu (i_\mu) \frac{di_\mu}{dt} &= k_s (i - i_\mu), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

$$k_s = \frac{r_k}{r_i};$$

r_k — сопротивление эквивалентного контура вихревых токов;

$$r_i = r - c_e \omega \Phi_{\text{ря}};$$

$k_{\text{ря}}$ — коэффициент реакции якоря;

T_s — постоянная времени цепи якоря.

Система уравнений (1) приводится к виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{1}{T_s} \left[U_c - c_e \omega \Phi_\mu (i_\mu) - (1 + k_s) i + k_s i_\mu \right] \\ \frac{di_\mu}{dt} &= \frac{k_3}{T_\mu (i_\mu)} (i - i_\mu). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Воспользуемся фазовой плоскостью с прямоугольной системой координат. Нас интересует единственная фазовая траектория, начинающаяся в точке $(i_0, i_{\mu 0})$, в которой находится САР в момент восстановления напряжения сети. Поэтому применим метод канонических полигонов. Этот метод обладает довольно высокой точностью и позволяет построить узкий «коридор», ограниченный полигонами, между которыми расположена искомая фазовая траектория. Предположим, что движение изображающей точки начинается из начала координат $(i=0, i_\mu=0)$. До тех пор, пока перестанет выполняться неравенство:

$$i < I_y + i_r,$$

где

I_y — ток установки,

i_r — половина ширины петли гистерезиса релейного элемента САР, схема сравнения САР выдает команду на шунтирование тиристорным ключом регулируемой ступени r_p , и в выражении для r_i следует подставлять значение r без учета r_p .

Наличие суммарного запаздывания τ_0 регулятора приводит к тому, что движение с выведенной ступенью продолжается и после того, как перестает выполняться условие (3), и это обстоятельство обуславливает значительный «выброс» тока якоря по отношению к току установки.

Обозначим:

$$\frac{di_\mu}{dt} = P(i, i_\mu); \quad \frac{di}{dt} = Q(i, i_\mu). \quad (4)$$

Тогда координаты i и i_μ можно представить в виде некоторого векторного поля мгновенных фазовых скоростей

$$P(i, i_\mu) \bar{a} + Q(i, i_\mu) \bar{b}, \quad (5)$$

\bar{a} и \bar{b} — единичные векторы по осям i и i_μ соответственно.

Точка установившегося состояния на фазовой плоскости находится путем совместного решения уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P(i, i_\mu) &= 0 \\ Q(i, i_\mu) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Это решение определяется построением так называемых «нулевой» и

«бесконечной» изоклин и нахождением их точек пересечения. Для нулевой изоклины имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{Q(i, i_\mu)}{P(i, i_\mu)} = 0.$$

Уравнение нулевой изоклины:

$$Q(i, i_\mu) = \frac{1}{T_s} \left[U_c - c_e \omega_d \Phi_\mu(i_\mu) - (1 + k_s) i + k_s i_\mu \right]. \quad (7)$$

Ее график для числовых данных

$$U_c = 750 \text{ в}, \quad c_e \omega_d = 7 \text{ сек}^{-1}, \quad r_i = 0,5 \text{ ом}, \quad r_K = 0,6 \text{ ом}$$

и зависимости $\Phi_\mu(i_\mu)$, приведенной на рис. 1, представлен на рис. 2.

Для бесконечной изоклины имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi(\infty) = \frac{Q(i, i_\mu)}{P(i, i_\mu)} = \infty. \quad (8)$$

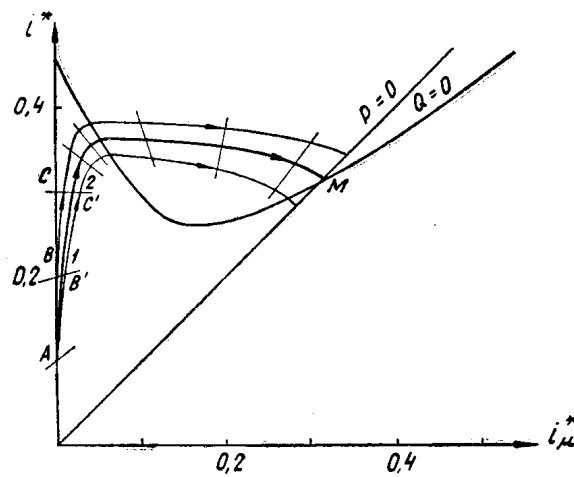


Рис. 2

Ее уравнение

$$P(i, i_\mu) = \frac{k_s}{T_\mu i_\mu} (i - i_\mu) = 0, \quad (9)$$

или

$$i = i_\mu. \quad (10)$$

Прямая (10) также представлена на рис. 2. Точка покоя M имеет координаты в относительных единицах: $I^*_{\infty} I^*_{\infty \mu} = 0,31$.

Построение полигонов ведется следующим образом. Для точки начала движения O определяются значения:

$$\left(\frac{di_\mu}{dt} \right)_0 = P(i_0, i_{\mu 0}); \quad \left(\frac{di}{dt} \right)_0 = Q(i_0, i_{\mu 0}). \quad (11)$$

Направление вектора поля в точке O определяется по знакам производных (11), а тангенс угла наклона вектора поля φ_0 — по их отношению. В нашем конкретном случае $\varphi_0 = 90^\circ$. В направлении вектора поля делается произвольный шаг до точки A (тем меньший, чем выше желаемая точность построения). В точке A снова определяется наклон вектора поля согласно (11) и находится $\operatorname{tg} \varphi_A$. В нашем случае $\varphi_A \approx 90^\circ$. Делаем второй шаг до точки B . Угол наклона вектора поля в точке B : $\varphi_B < 90^\circ$. Из

точки A параллельно вектору поля в точке B , т. е. под углом φ_B к оси абсцисс проводится отрезок прямой произвольной длины. Строится участок изоклины I , проходящей через точку B и пересекающей проведенный отрезок прямой в точке V . Это построение ведется по уравнению:

$$\operatorname{tg} \varphi_B = \frac{Q(i, i_\mu)}{P(i, i_\mu)}, \quad (12)$$

в которое подставляются произвольные значения переменной i_μ (или i) и находятся значения второй переменной i (или i_μ). Делается следующий шаг из точки B в точку C , и построением находится точка C . В результате получается левоканонический ($OABC\dots$) и правоканонический ($OABC\dots$) полигоны, между которыми симметрично расположена искомая фазовая траектория. На рис. 2 эта траектория построена для $T_s = 0,02$ сек и зависимости $T_p(v)$, $i_\mu(v)$, приведенной на рис. 1.

Построение переходного процесса во времени $i' f_1(t')$ можно выполнить путем приближенного интегрирования одного из уравнений (2). Запишем первое из них в приращениях:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{1}{T_s} \left[U_c - c_e \omega \Phi_\mu(i_\mu) - (1 + k_s) + k_s i_\mu \right]. \quad (13)$$

Здесь значения i и i_μ связаны между собой найденной фазовой траекторией. Для нахождения приращений времени Δt_n нужно приращения тока якоря Δi_n и соответствующие ему средние значения токов i_{cp} и $i_{\mu cp}$ подставить в уравнение (13). Сумма приращений тока якоря дает значения i_n , соответствующие значе-

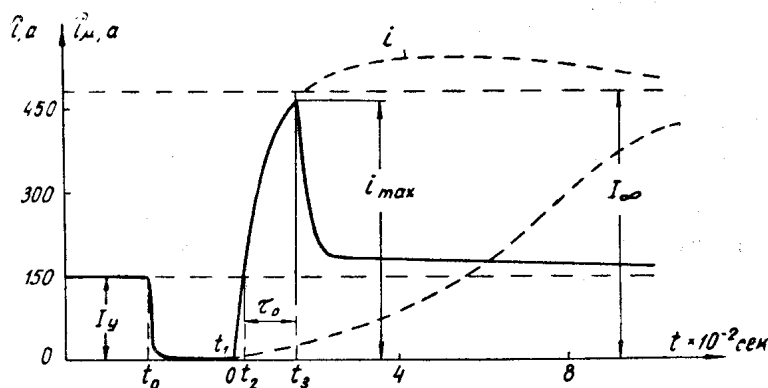


Рис. 3

ниям времени t_n , также полученным суммированием всех предыдущих приращений времени. На рис. 3 приведена кривая переходного процесса $i = f(t)$, построенная по уравнению (13), причем отсчет времени начат с точки $t = t_1$. Эта кривая позволяет весьма просто построить зависимость $i_\mu = t_2(t)$, используя взаимосвязь i и i_μ через фазовую траекторию. Кривая $i_\mu = t_2(t)$ в определенном масштабе отражает характер изменения потока во время переходного процесса. В момент t_2 перестает выполняться неравенство (3) (гистерезисная зона на рис. 3 не показана), схема сравнения выдает команду на закрывание тиристорного ключа, и начинается отсчет времени запаздывания τ_0 . В момент его окончания t_3 тиристорный ключ закрывается, вводится регулируемая ступень r_p , и ток i , достигнув максимального значения i_{max} , уменьшается.

Исследование кривых переходного процесса показывает, что при восстановлении питания на вращающемся двигателе последовательного возбуждения скорость нарастания тока якоря в десятки раз превышает скорость нарастания магнитного потока. Поэтому к быстрдействию регулятора должны предъявляться исключительно высокие требования.