Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXII, вып. 1, 1972 г.

СИСТЕМА ФАЗОИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

И. М. Столяров

Индукционная машина переменного тока в общем случае может быть представлена в виде динамической системы из подвижных и неподвижных контуров (рис. 1).

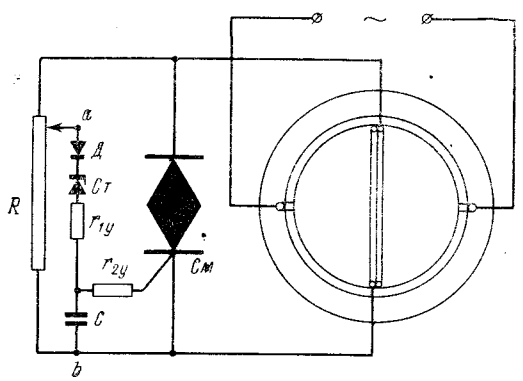


Рис. 1. Схема управления двигателем

Энергия, запасенная в магнитном поле машины,

$$W = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j L_{ij} i_i i_j,$$

где L_{ij} — индуктивность и взаимная индуктивность контуров машины; i_i, i_j — токи i-го и j-го контуров машины.

Мгновенное значение электромагнитного момента*

$$m = \left[-\frac{\partial W}{\partial \Theta} \right]_{\substack{i_i = \text{const} \\ i_j = \text{const}}} = -\sum_i \sum_j i_i j_j \frac{\partial L_{ij}}{\partial \Theta}, \qquad (1)$$

где Θ — угол поворота ротора.

* Тамм И. Е. Основы теории электричества. Гостехтеоретиздат, 1956.

Среднее значение момента

$$M = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} m d\Theta = -\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{\partial W}{\partial \Theta}\, d\Theta. \qquad (2)$$

Если воздушный зазор по окружности машины равномерен, то $L_{ij}=\text{const}$ (собственные индуктивности контуров) при $i=j$; L_{ij} (взаимные индуктивности) при $i\neq j$ представляют собой периодические функции от Θ.

Для простейшей машины с одним контуром в каждой группе взаимную индуктивность можно представить в форме

$$L_{1,2} = L_m \sin p\,\Theta.$$

Тогда необходимым условием создания электромагнитного момента будет неравенство

$$\int_0^{2\pi} m d\,\Theta = -\int_0^{2\pi} i_1 i_2 \frac{\partial L_{1,2}}{\partial \Theta}\, d\Theta \neq 0. \qquad (3)$$

Рассмотрим возможные варианты схем электрических машин, при которых выполняется это неравенство, если в установившемся режиме $\Theta=\Omega t$ (Ω — угловая скорость ротора),

$$1.\ i_1 = \text{const};\ i_2 = I_{m_2}\sin\omega_2 t;\ L_{1,2} = L_m \sin p\,\Theta.$$

Условие (3) выполнимо при $\omega_2 = p\Omega$, что, очевидно, соответствует синхронной или коллекторной машине.

$$2.\ i_1 = I_{m_1}\sin\omega_1 t;\ i_2 = I_{m_2}\sin\omega_2 t;\ L_{1,2} = L_m \sin p\,\Theta.$$

Условие (3) будет выполнено при $\omega_1 = \omega_2 \pm p\Omega$. Очевидно, это соответствует асинхронной машине.

Оба случая хорошо изучены и характерны наличием жесткой связи между частотами токов в контурах и скоростью вращения ротора.

3. i_1 и i_2 — величины переменные; $\left|\frac{\partial L_{12}}{\partial\,\Theta}\right|$ — при фазоимпульсном управлении величина возрастающая.

Условие (3) выполнимо без необходимых связей между частотой и скоростью. Очевидно, в такой машине вторичный контур не может быть замкнут постоянно, т. е. в этом случае мы получаем специальную машину переменного тока с импульсно-фазовым управлением вторичной цепи. Вторичный контур замыкается только в такие интервалы времени, на которых $\frac{\partial L_{12}}{\partial\,\Theta}$ имеет один и тот же знак. Назовем их рабочими.

Пусть первичный контур питается от источника тока, а вторичный замыкается на рабочих интервалах времени.

Уравнение для рабочих интервалов времени $(0;\ t_2)$

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= I_m \sin(\omega t + \varphi) \\ L_2\frac{di_2}{dt} + \frac{d(L_{12} i_1)}{dt} &= 0 \\ L_{12} &= L_m \cos\Omega t \end{aligned}\right\}. \qquad (4)$$

За начало отсчета времени взят момент, когда L_{12} максимально. Предположим, что активное сопротивление вторичного контура $r_2=0$.

Решение системы (4) с учетом выражений (1) и (2) позволяет получить среднее значение электромагнитного момента за рабочий интервал

$$i_2 = -\frac{L_m I_m}{2L_2}\{\sin[(\Omega+\omega)t+\varphi]-\sin[(\Omega-\omega)t-\varphi]\}+C.$$

При $t=0$, $i_2=0$

$$C=\frac{I_m L_m}{L_2}\sin\varphi.$$

Из формулы (1)

$$m=-\frac{L_m^2 I_m^2}{2L_2}\{\sin(\omega t+\varphi)\sin\Omega t\,[\sin[(\Omega+\omega)t+\varphi]-$$

$$-\sin[(\Omega-\omega)t-\varphi]]-2\sin\varphi\,\sin\Omega t\,\sin(\omega t+\varphi)\}. \qquad (5)$$

Преобразовав выражение (5), найдем

$$m=-M_m[\sin 2\xi\omega t\,\sin^2(\omega t+\varphi)+$$

$$+2\sin\varphi\,\sin\xi\omega t\,\sin(\omega t+\varphi)], \qquad (6)$$

где $\xi=\frac{\Omega}{\omega}$ — скорость, относит. един.;

$$M_m=\frac{L_m^2 I_m^2}{2L_2}.$$

Пусть рабочий интервал $(0;\ t_2)$. Тогда среднее значение момента на этом интервале

$$M=\frac{1}{t_2}\int_0^{t_2} m\,dt. \qquad (7)$$

Подставив в формулу (7) значение (6), получим

$$M=-\frac{M_m}{t_2}(I_1+2I_2\sin\varphi), \qquad (8)$$

где

$$I_1=\int_0^{t_2}\sin 2\xi\omega t\,\sin^2(\omega t+\varphi)\,dt=$$

$$=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{\omega\xi}-\frac{\xi}{2\omega(\xi^2-1)}\cos\left(\frac{\pi}{\xi}+2\varphi\right)-\frac{\xi}{2\omega(\xi^2-1)}\cos 2\varphi\right];$$

$$I_2=\int_0^{t_2}\sin\xi\omega t\,\sin(\omega t+\varphi)\,dt=$$

$$=\frac{1}{\omega(\xi^2-1)}\cos\left(\frac{\pi}{2\xi}+\varphi\right)+\frac{\xi}{\omega(\xi^2-1)}\sin\varphi.$$

Подставив I_1 и I_2 в формулу (8) с учетом $t_2 = \frac{\pi}{2\omega\xi}$, после преобразований получим

$$M = -M_m \left\{ \frac{1}{\pi} - \frac{\xi^2}{2\pi(\xi^2-1)} \left[\cos\left(\frac{\pi}{\xi} + 2\varphi\right) + \cos 2\varphi \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{4\xi \sin\varphi}{\pi(\xi^2-1)} \cos\left(\frac{\pi}{2\xi} + \varphi\right) + \frac{4\xi^2 \sin^2\varphi}{\xi^2-1} \right\}. \quad (9)$$

Для практически важного частного случая $\varphi = \frac{\pi}{2}$ получаем из формулы (9)

$$M = -M_m \left[\frac{1}{\pi} + \frac{4\xi^2}{\xi^2-1} + \frac{\xi^2}{2\pi(\xi^2-1)} \cos\frac{\pi}{\xi} - \right.$$

$$\left. - \frac{4\xi}{\pi(\xi^2-1)} \sin\frac{\pi}{\xi} \right].$$

При $\varphi=0$ из уравнения (9) находим (рис. 2)

$$M = -M_m \left[\frac{1}{\pi} - \frac{\xi^2}{2\pi(\xi^2-1)} \cos\left(\frac{\pi}{\xi} + 1\right) \right].$$

Если продолжительность рабочего интервала в n раз меньше, то пределы интегрирования при определении среднего электромагнитного момента за рабочий интервал будут в n раз меньше и, соответственно, изменится скорость. Она будет изменяться также и с изменением тока или угла φ.

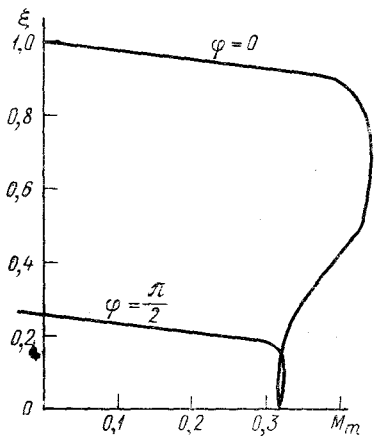


Рис. 2. Механические характеристики двигателя

Таким образом, приведенный качественный анализ свидетельствует о том, что скорость вращения машины переменного тока с фазоимпульсным управлением можно регулировать изменением: а) величины питающего тока (питающего напряжения); б) продолжительности рабочего интервала; в) фазы φ.

Экспериментальная машина выполнена на магнитной системе от асинхронного двигателя типа МТ-25-6. На статоре и роторе уложено по одной сосредоточенной обмотке. Статорная обмотка состоит из 3 секций по 36 витков, роторная — из 35 секций по 40 витков. Статорная обмотка подключена к сети, роторная выведена на контактные кольца со щетками. Фазоимпульсное управление ротором осуществлено на симмисторе. Схема замыкает вторичный контур машины в момент достижения максимального значения потокосцепления этого контура. Величина потокосцепления контролируется по э. д. с. на зажимах симмистора. Величину э. д. с. контролирует стабилитрон (может быть и другой нелинейный элемент, например, тунельный диод). При достижении э. д. с. заданного значения стабилитрон открывается и ток, протекающий в этой цепи, заряжает конденсатор. Параметры цепи управления выбраны так, что время заряда

значительно меньше времени разряда конденсатора. Время разряда определяет продолжительность включения симмистора.

При экспериментальном исследовании проверяли регулировочные свойства двигателя с изменением длительности интервала $(0;\ t_2)$. В результате установлено, что схема обеспечивает регулирование в диапазоне 1 : 10, и процесс регулирования не сопровождается дополнительными потерями (например, потери скольжения асинхронного двигателя).

Если в предлагаемой машине управляющий симмистор установить на роторе, то кольца будут необходимы только для передачи управляющих сигналов.

При пробое стабилитрона образуется цепь, описываемая системой

$$\left.\begin{aligned} &i_{1y}\,r_{1y} + i_{2y}\,r_{2y} = u - E_0 \\ &i_{2y}\,r_{2y} - \frac{1}{C}\int i_c dt = 0 \\ &i_{2y} + i_c - i_{1y} = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

где r_{2y} учитывает сопротивление управляющего электрода; E_0 — напряжение на стабилитроне; $u = U_m \sin\omega t$ — напряжение, подаваемое на зажимы управляющей цепочки $a-b$ (см. рис. 1).

Стабилитрон будет открыт в течение части одного полупериода. За это время зарядится конденсатор и откроется полупроводниковый прибор. Можно считать, что напряжение на этом интервале времени синусоидальное. Решая систему (10), найдем

$$i_{2y} = \frac{1}{r_{1y}\,r_{2y}\,C}\left[\frac{U_m \tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}\sin(\omega t - \psi) - E_0\,\tau + C_1 e^{-\left|\frac{t}{\tau}\right|}\right], \qquad (11)$$

где

$$\tau = \frac{r_{1y}\,r_{2y}\,C}{r_{1y} + r_{2y}};\quad \operatorname{tg}\psi = \omega\tau.$$

Обозначим

$$r_{2y}\,C = \tau_2,$$

тогда

$$\tau = \frac{r_{1y}}{r_{1y} + r_{2y}}\,\tau_2 .$$

Пусть стабилитрон открывался в момент времени $t=t'$. Начальными условиями будут: $t=t'$; $i_{2y}=0$, где для t' значение $U_m \sin\omega t' = E_0$.

Для этих условий находим

$$C_1 = e^{\frac{t'}{\tau}}\left[E_0\,\tau - \frac{U_m \tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}\sin(\omega t' - \psi)\right]. \qquad (12)$$

Подставив выражение (12) в формулу (11), после преобразований находим

$$i_{2y} = \frac{1}{r_{1y} + r_{2y}}\left\{\frac{U_m}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}\sin(\omega t - \psi) - E_0 + \right.$$

$$\left. + \left[E_0 - \frac{U_m}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}\sin(\omega t' - \psi)\right] e^{\frac{t'-t}{\tau}}\right\}. \qquad (13)$$

При достижении током i_{2y} значения $i_{2y\,ср}$ (равного току срабатывания симмистора) симмистор откроется в момент времени $t=t''$. Величину t'' можно определить из выражения (13) при известном $i_{2y_{ср}}$.

Напряжение на емкости С при $t=t''$

$$U_c = i_{2y_{ср}} r_{2y}.$$

На интервале $(t''; \infty)$ емкость C разряжается на сопротивление r_{2y} и ток

$$i_{2y} = i_{2y\,ср}\, e^{-\frac{t}{\tau_2}}.$$

Пользуясь полученными соотношениями для заданных значений E_0, τ, τ_2, а также t' и t'', можно рассчитать все элементы схемы управления. Может оказаться, что ток i_{2y} недостаточен для управления полупроводниковым прибором. Тогда его можно усилить в β раз включением полупроводникового триода.