

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ  
ПРОЦЕССОВ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ

А. А. БУЙМОВ, Е. В. КОНОНЕНКО, А. Ф. ФИНК

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Анализ электромеханических переходных процессов даже в наиболее простом случае работы тихоходных синхронных двигателей при питании их от сети бесконечно большой мощности крайне затруднителен. Это объясняется тем, что при переменной скорости вращения ротора система дифференциальных уравнений, описывающая переходные электромеханические процессы, является нелинейной и не имеет регулярных методов решения. Используя операторную форму записи, уравнения в системе относительных единиц могут быть записаны:

$$\begin{aligned} -U \sin \Theta &= p \Psi_d - \Psi_q (1 - s) + r \cdot i_d, \\ U \cos \Theta &= p \Psi_q + \Psi_d (1 - s) + r \cdot i_q, \\ M_{\text{ст}} &= H \cdot ps + (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d), \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$H = \frac{4I\omega_1^3}{P_0 Z_2^2}, \quad \Psi_d = x_d \cdot i_d, \quad \Psi_q = x_q \cdot i_q.$$

Данная система уравнений, при заданных параметрах и напряжениях, содержит пять переменных:  $\Theta$ ,  $\Psi_d$ ,  $\Psi_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$ . Время  $t$  является независимой переменной, а скольжение  $s$  определяется уравнением

$$s = \frac{1}{\omega_1} \frac{d\Theta}{dt}. \text{ Для решения этой системы уравнений была использована}$$

аналоговая вычислительная машина ЭМУ-10. Структурная схема соединений решающих элементов, соответствующая системе уравнений (1), представлена на рис. 1. Для расширения диапазона изменения угла  $\Theta$  в нее входит устройство периодизации. Изменяя коэффициенты машинных уравнений, можно провести большую программу исследований переходных электромеханических процессов тихоходных синхронных реактивных двигателей.

### Пуск и втягивание в синхронизм

Условия пуска и втягивания в синхронизм зависят от нагрузки на валу и параметров двигателя, а также инерционной постоянной вращающихся масс.

При исследовании пуска и втягивания в синхронизм полагаем, что в начальный момент времени ротор неподвижен и к обмотке статора подводится номинальное напряжение. Результаты решения можно получить

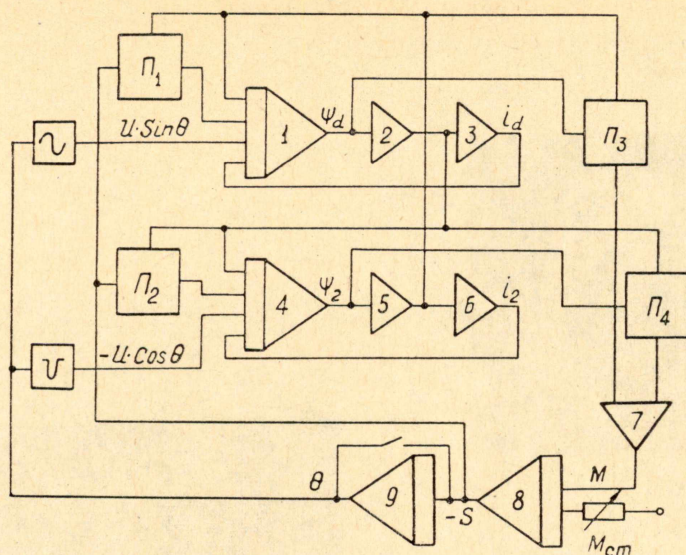


Рис. 1. Структурная схема модели

в виде осциллограмм, представляющих зависимости интересующих нас величин (электромагнитного момента, угла  $\theta$ , токов, потокосцеплений и т. д.) от скольжения или времени при различных значениях параметров.

На рис. 2 приведены механические характеристики, рассчитанные при пуске двигателя, имеющем различные инерционные постоянные:

а)  $H=3,5$ , б)  $H=4,0$ , в)  $H=4,5$ . Двигатель имел следующие параметры  $x_d=1,3$ ,  $x_q=0,9$ ,  $r=0,1$ . Как следует из данных осциллограмм, увеличение инерционной постоянной приводит к ухудшению пусковых свойств. При  $H=3,5$  двигатель надежно втягивается в синхронизм, и колебания около положения равновесия быстро затухают. При  $H=4,0$  пуск становится неустойчивым и при втягивании в синхронизм наблюдаются длительные колебания около положения равновесия. При  $H=4,5$  пуск двигателя становится невозможным. Если пренебречь переходными электромагнитными процессами, то условия, при которых произойдет втягивание в синхронизм, можно определить решением уравнения движения ротора:

$$Hps + M_m \sin 2\theta = M_{см}, \quad (2)$$

где  $M_m$  — максимальный электромагнитный момент.

Анализируя уравнение (2) и используя [2], можно получить упрощенный критерий втягивания в синхронизм в виде

$$f = k \sqrt{\frac{M_m z_2}{2\pi G D^2}}, \quad (3)$$

где

$f$  — максимальная частота, при которой возможно втягивание в синхронизм ротора двигателя,

$z_2$  — число зубцов ротора,

$k=1,8$  эмпирический коэффициент, полученный на основании опытных данных.

На рис. 3 приведены экспериментальная и расчетная зависимости частоты питающей сети от момента инерции вращающихся масс. Как следует из приведенных кривых, они достаточно хорошо совпадают.

#### Устойчивость работы тихоходных синхронных реактивных двигателей

При работе тихоходных синхронных реактивных двигателей возможны нарушения нормального режима вследствие изменения парамет-

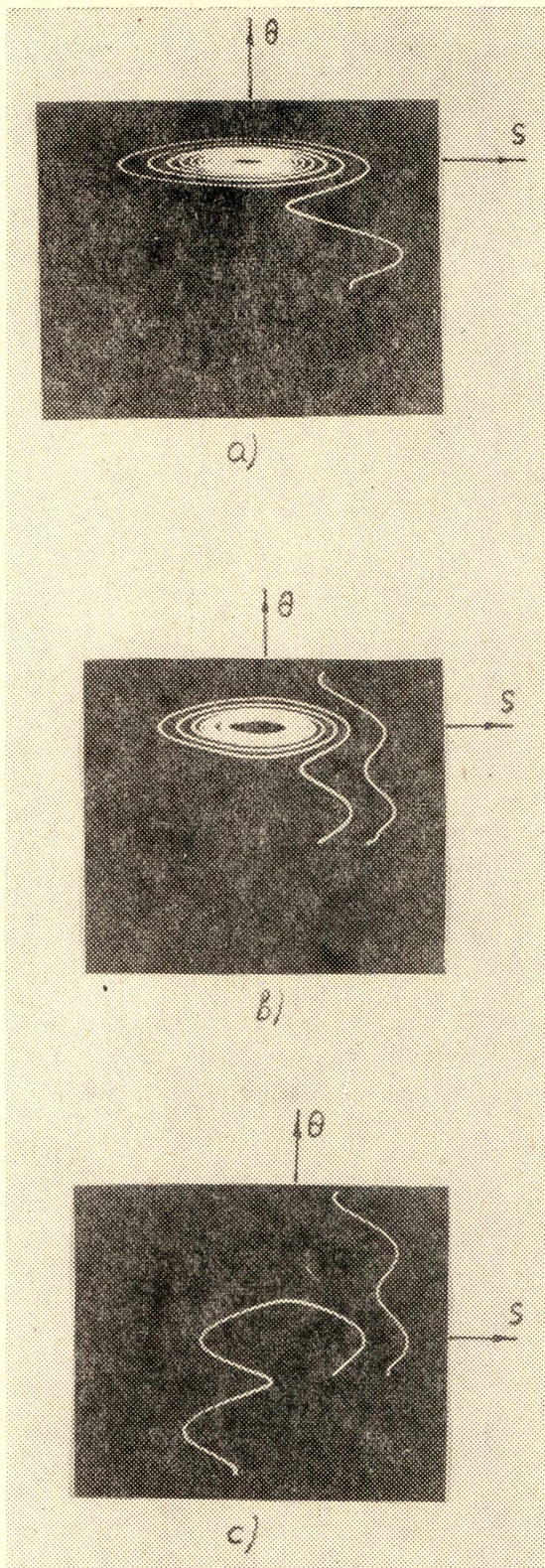


Рис. 2. Механические характеристики двигателя:  
 а)  $N=3,5$ , б)  $N=4,0$ ,  
 в)  $N=4,5$

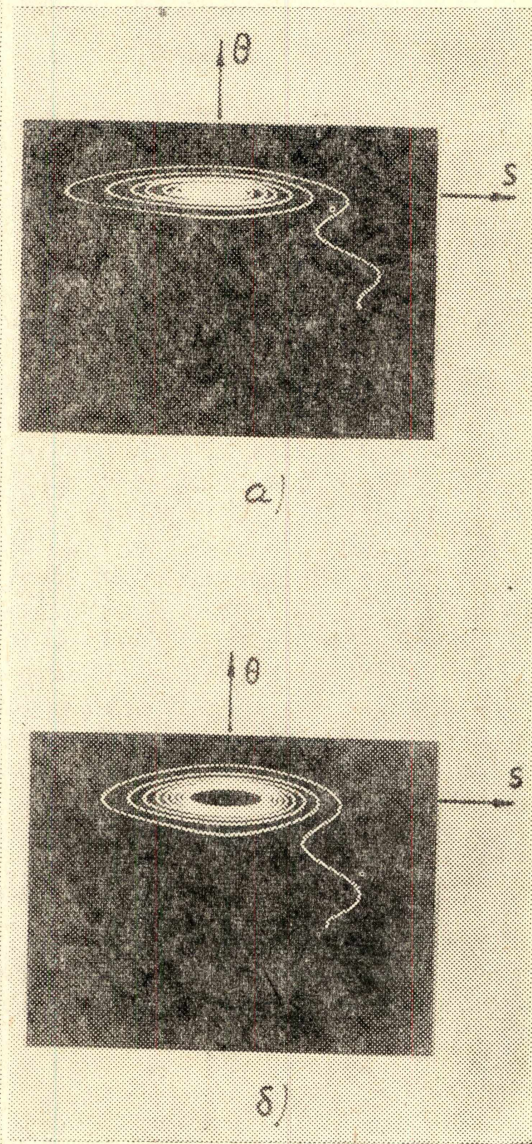


Рис. 4. Механические характеристики двигателя:  
 а)  $r=0,1$  б)  $r=0,5$

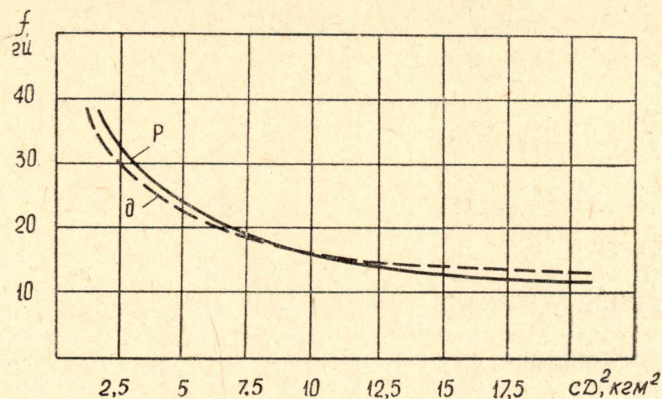


Рис. 3

ров электрических цепей двигателя, момента сопротивления или напряжений, действующих на зажимах. Существенное влияние на устойчивость работы оказывает величина активного сопротивления цепи обмотки статора. На рис. 4 приведены осциллограммы, рассчитанные для двигателя, имеющего следующие параметры:

- а)  $x_d=1,3$ ,  $x_q=0,9$ ,  $r=0,5$ ,  $H=3,5$ .  
 б)  $x_d=1,3$ ,  $x_q=0,9$ ,  $r=0,1$ ,  $H=3,5$ .

Из данных осциллограмм следует, что в отличие от обычных синхронных машин увеличение активного сопротивления тихоходного синхронного реактивного двигателя, не имеющего обмоток на роторе, сокращает время пуска и делает более устойчивой его работу. Так, на рис. 4 а двигатель после втягивания в синхронизм имеет установившуюся амплитуду колебаний угла  $\Theta=22^\circ$ . Увеличение активного сопротивления обмотки статора до  $r=0,5$  позволяет получить устойчивую работу двигателя после втягивания в синхронизм.

При наличии резкопеременных нагрузок двигателей, а также частых пусков и реверсов необходимо исследование динамической устойчивости. Двигатель в этих режимах не должен выпадать из синхронизма и в некоторых случаях иметь ограниченную быстрозатухающую амплитуду колебаний. При рассмотрении динамической устойчивости можно ограничиться решением уравнения движения ротора (2), которое с учетом асинхронного момента ( $k_p\theta$ ) при  $M_{cm}=0$  может быть представлено в виде

$$Hr^2\ddot{\theta} + k_p\dot{\theta} + M_m\sin 2\theta = 0. \quad (3)$$

После интегрирования данного уравнения и ряда математических преобразований получим

$$\frac{d\theta}{dt} = \sqrt{a\theta + b \cdot \cos \cdot 2\theta + c}, \quad (4)$$

где

$$a = -\frac{2k}{H}, \quad b = \frac{M_m}{H}, \quad c = -(a\theta_0 + b\cos 2\theta_0).$$

Двигатель будет работать устойчиво в том случае, если существует максимальное отклонение угла, при котором угловая скорость вращения ротора относительно вращающегося магнитного поля равна нулю, т. е.

$$\frac{d\theta}{dt} = 0.$$

Следовательно, условие динамической устойчивости можно выразить аналитическим уравнением

$$a\theta + b\cos 2\theta + c = 0$$

или

$$\frac{a}{b}\theta + \frac{c}{b} = -\cos 2\theta. \quad (5)$$

Возможные решения уравнения (5) зависят от величин  $\frac{a}{b}$  и  $\frac{c}{b}$ .

Исследуя предельные случаи возможных решений, можно установить значения величин  $\frac{a}{b}$  и  $\frac{c}{b}$ , при которых система остается еще устойчивой. Эти значения определяют граничную кривую устойчивости.

Если положить  $k=0$ , то уравнение (4) примет вид

$$\frac{d\theta}{dt} = \sqrt{\frac{M_m}{H}(\cos 2\theta - \cos 2\theta_0)}. \quad (6)$$

Полагая  $\frac{d\theta}{dt} = 0$ , получим, что двигатель работает устойчиво при  $\theta = \theta_0$ , т. е. малейшие влияния возмущения приводят к неустойчивой работе двигателя.

Таким образом, решение уравнения движения ротора в первом приближении позволяет оценить влияние параметров на область устойчивой работы двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кононенко, Р. П. Лаас, А. Ф. Финк. Основные уравнения синхронных редукторных двигателей реактивного типа (СРД-Р). Известия ТПИ, т. 212, 1971.
2. С. Н. Лее. Верньерный двигатель и его расчет. «Электрические системы и электротехническое оборудование», 1963, № 6.