

СНЯТИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

А. И. ЗАЙЦЕВ, М. П. ТАБИНСКИЙ, А. С. БОБРОВСКИЙ

При снятии механической характеристики асинхронного двигателя больше всего затруднений возникает при измерении вращающего момента двигателя. Установки для определения вращающего момента двигателя по тормозящему моменту, который создается шунтовыми машинами постоянного тока, отличаются громоздкостью и большой установленной мощностью, в $3 \div 4$ раза превышающей мощность испытуемого двигателя. Поэтому большой интерес представляет способ определения вращающего момента по ускорению, развиваемому двигателем при пуске или торможении без нагрузки, то есть при статическом моменте, равном нулю ($M_{ст} \approx 0$). В этом случае уравнение движения ротора и соединенных с ним вращающихся масс имеет выражение

$$M_{дв} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где $M_{дв}$ — момент двигателя, $\kappaГм$;
 J — суммарный момент инерции вращающихся масс, $\kappaГм \text{ сек}^2$;
 ω — угловая скорость двигателя в радианах в секунду, $\frac{1}{\text{сек}}$.

Таким образом, при известном моменте инерции измерение момента двигателя ($M_{дв}$) сводится к измерению ускорения $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)$. Имея графики скорости $\omega = f_1(t)$ и ускорения $\frac{d\omega}{dt} = f_2(t)$, легко построить функцию $\omega = \varphi_1\left(\frac{d\omega}{dt}\right)$, или $\omega = \varphi_2(M_{дв})$, то есть механическую характеристику двигателя.

При наличии шлейфового осциллографа запись скорости двигателя $\omega = f_1(t)$ не вызывает затруднений. Ускорение двигателя можно определить путем дифференцирования напряжения, пропорционального скорости, при помощи конденсатора. Схема установки для определения $\frac{d\omega}{dt} = f_2(t)$ изображена на рис. 1.

На вал испытуемого двигателя (АД) насажен маховик (М). Сцепленный жестко с валом двигателя тахогенератор (ТГ) дает напряжение, пропорциональное скорости,

$$U_{m2} = k \cdot \omega_{\text{дв}}. \quad (2)$$

В цепь тахогенератора последовательно включены конденсатор C и шлейф осциллографа ШО, обладающий сопротивлением R . При изменении напряжения тахогенератора U_{m2} через конденсатор протекает ток заряда

$$i = C \frac{dU_c}{dt}. \quad (3)$$

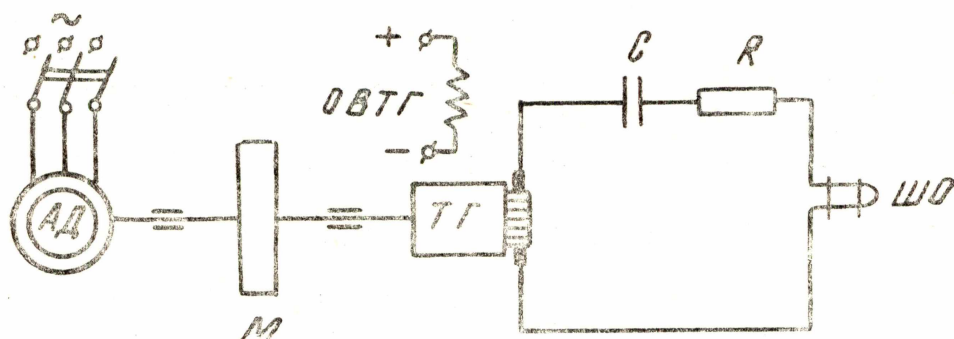


Рис. 1.

К конденсатору приложено напряжение, равное

$$U_c = U_{m2} - U_R = U_{m2} - iR, \quad (4)$$

следовательно,

$$i = C \frac{d}{dt} (U_{m2} - iR). \quad (5)$$

Разделяя переменные, получим

$$i - RC \frac{di}{dt} = C \frac{dU_{m2}}{dt}. \quad (6)$$

Если RC настолько мало, что членом $RC \frac{di}{dt}$ уравнения (6) можно пренебречь, то получим приближенно

$$i \approx C \frac{dU_{m2}}{dt} = C \cdot k \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt}. \quad (7)$$

Ток заряда конденсатора, пропорциональный ускорению двигателя, записывается шлейфом осциллографа.

Метод определения ускорения двигателя при помощи дифференцирования конденсатором напряжения, пропорционального скорости, был предложен еще в 1912 г. Иттербергом [1, 2], но, несмотря на свою простоту, не нашел широкого распространения по следующим причинам:

1) обычные тахометрические генераторы, как известно, дают напряжение, содержащее коллекторные пульсации, которые при дифференцировании создают настолько большие помехи, что выделить производную невозможно. Чтобы уменьшить коллекторные пульсации, необходимо применять машины с большим числом коллекторных ламелей (не менее 200) и ставить сглаживающие фильтры [2, 3];

2) валы испытуемого двигателя и тахогенератора должны соединяться жестко (без упругих элементов) и строго соосно. Это требование делает подготовку эксперимента очень трудоемкой [2];

3) при низких скоростях нелинейность щеточного сопротивления вносит неточности при измерениях [1].

Авторам удалось устранить эти недостатки и сконструировать установку, позволяющую снимать механические характеристики асинхронного двигателя, которые наблюдаются на экране электронно-лучевого осциллографа. Блок-схема установки изображена на рис. 2.

На вал испытуемого двигателя АД насажен маховик М. При помощи карданного валика асинхронный двигатель соединяется с дифференциалом Д, в котором происходит сложение скорости двигателя АД с постоянной скоростью вспомогательного асинхронного двигателя ВД. Необходимость применения дифференциала будет обоснована ниже. Алгебраическая сумма скоростей асинхронного двигателя АД и вспомогательного ВД из дифференциала подается на тахогенератор ТГ. В качестве тахогенератора используется двухфазный асинхрон-

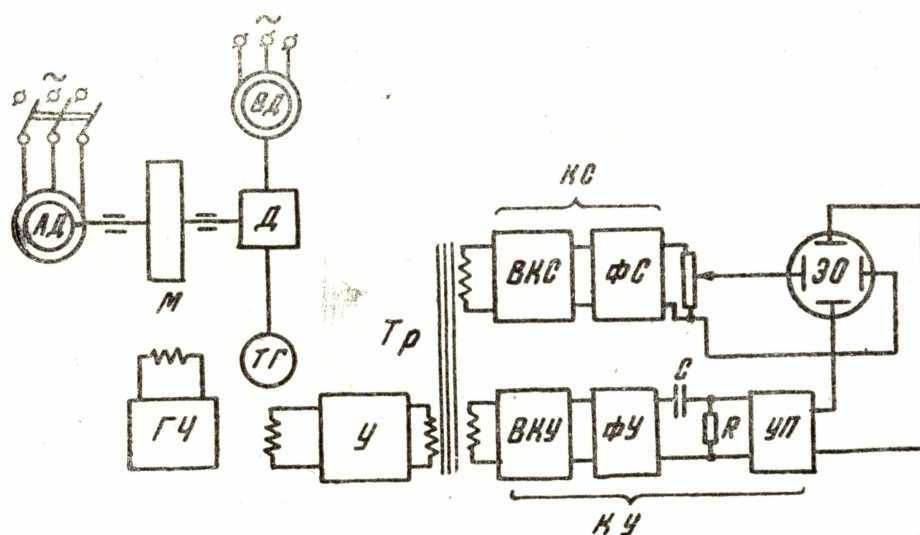


Рис. 2.

ный двигатель с полым немагнитным ротором (типа ЭМ-4 или ЭМ-8). При питании одной обмотки двухфазного двигателя переменным током определенной частоты в другой обмотке, находящейся в квадратуре с первой, индуцируется переменная электродвижущая сила той же частоты, пропорциональная скорости вращения ротора двигателя. К первичной обмотке тахогенератора приложено напряжение $1 \div 5$ в при частоте 1000 гц, получаемое в блоке генератора синусоидального напряжения ГЧ. Так как выходное напряжение тахогенератора мало, оно усиливается электронным усилителем У1. После усиления мощности с выходного трансформатора Тр напряжение поступает в два канала: канал скорости КС и канал ускорения КУ. В каждом канале напряжение выпрямляется при помощи двухполупериодного полупроводникового выпрямителя (ВКС и ВКУ) и сглаживается П-образным фильтром низкой частоты (ФС и ФУ).

Напряжение из канала скорости через делитель поступает в электронно-лучевой осциллограф (ЭО) для горизонтального отклонения луча. В канале ускорения напряжение, пропорциональное ускорению двигателя, выделяется на сопротивлении R дифференцирующей це-

почки. После предварительного усиления на парафазном усилителе постоянного тока УП оно подается в осциллограф для вертикального отклонения луча.

При пуске или реверсировании двигателя АД луч осциллографа описывает на экране механическую характеристику (рис. 3, а, б).

Выше было отмечено, что для выпрямления переменного напряжения, пропорционального скорости, применяется диодный мост. Недостатком диодного моста является то, что полярность напряжения на выходе выпрямителя при изменении скорости от $-\omega$ до $+\omega$ не меняется. Применить фазовый дискриминатор вместо диодного моста нельзя, так как фаза выходного напряжения тахогенератора зависит от скорости. Этот недостаток устраняется, если применить сложение скоростей испытуемого двигателя АД и вспомогательного двигателя ВД, вращающегося с постоянной скоростью при помощи механического дифференциала. В этом случае можно добиться, чтобы при ре-

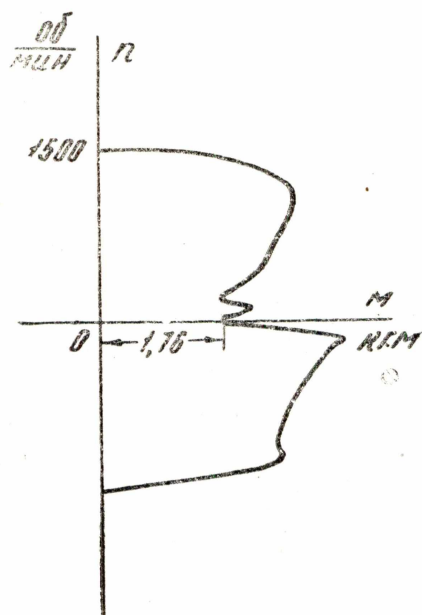


Рис. 3 а. Механическая характеристика двигателя ИЗО = $21/4$, $P_H = 1,5$ квт.

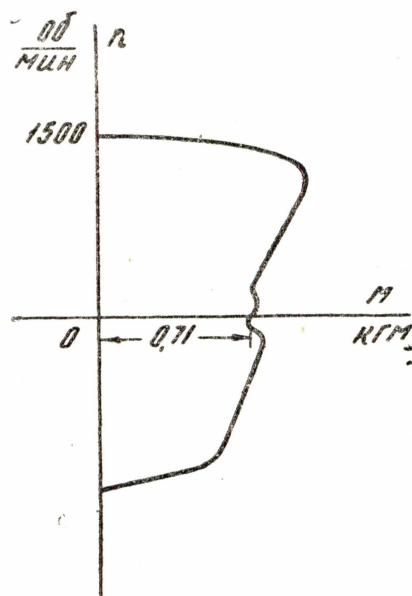


Рис. 3 б. Механическая характеристика двигателя А $31/4$, $P_H = 0,6$ квт.

версировании испытуемого двигателя АД от $-\omega$ до $+\omega$ на выходе дифференциала скорость менялась от 0 до $j\omega$, где j — передаточный коэффициент редуктора. При неподвижном двигателе АД на выходе дифференциала скорость равна $\frac{j\omega}{2}$; соответствующее этой скорости

напряжение после выпрямления принимается за нулевое. При изменении скорости АД от 0 до $+\omega$ напряжение на выходе выпрямительного моста будет увеличиваться, а при изменении скорости от 0 до $-\omega$ — уменьшаться.

Таким способом можно получить механическую характеристику во всех квадрантах.

В качестве дифференциала с успехом можно применить шарикоподшипник. Шариковый сепаратор вращается со скоростью, пропорциональной сумме или разности угловой скорости наружного и внутреннего кольца (считаем, что скольжение шариков отсутствует).

Из рис. 4 видно, что скорость точки A равна

$$V_A = \omega_1 R_1, \quad (8)$$

или

$$V_A = \omega_4 R_1 + \omega_3 R_3. \quad (9)$$

Скорость точки B равна

$$V_B = \omega_2 R_2, \quad (10)$$

или

$$V_B = \omega_4 R_2 - \omega_3 R_3, \quad (11)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ — угловые скорости внутреннего, наружного кольца, шариков и сепаратора;

$R_1; R_2; R_3$ — радиусы внутреннего, наружного кольца и шариков.

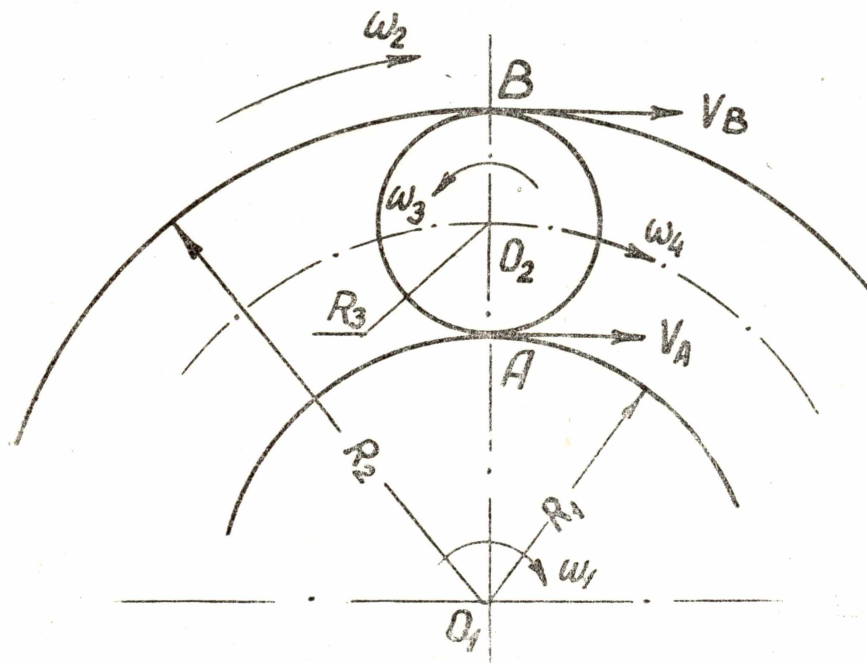


Рис. 4.

Из уравнений (8) и (9) имеем

$$\omega_1 R_1 = \omega_4 R_1 + \omega_3 R_3, \quad (12)$$

а из уравнения (10) и (11)

$$\omega_2 R_2 = \omega_4 R_2 - \omega_3 R_3. \quad (13)$$

Решая уравнение (12) и (13) относительно ω_4 , получим

$$\omega_4 = \frac{\omega_1 R_1 + \omega_2 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (14)$$

Таким же образом получаем формулу для обратного направления ω_2

$$\omega_4 = \frac{\omega_1 R_1 - \omega_2 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (15)$$

Конструктивно дифференциал из шарикоподшипника легко выполним (рис. 5). Вращение испытуемого двигателя АД передается при помощи карданного валика (1) и обоймы (2) на наружное кольцо

цо шарикоподшипника (3). Внутреннее кольцо шарикоподшипника напрессовано на вал вспомогательного двигателя ВД. Для передачи вращения от сепаратора к ротору двухфазного тахогенератора служит муфта сцепления (4), кулачки которой входят в углубления сепаратора, и зубчатая (или фрикционная) пара (5). Муфта сцепления свободно вращается на шарикоподшипнике (6), насаженном на вал вспомогательного двигателя. Проведенные опыты показали, что механические характеристики, снятые при помощи описанной установки с шарикоподшипниковым дифференциалом, совершенно аналогичны характеристикам, снятым при помощи установки с шестеренчатым дифференциалом. Это показывает, что в данном случае скольжения шариков по отношению колец нет.

Описанная установка имеет следующие достоинства:

1) асинхронный тахогенератор дает напряжение с высокой точностью (до 0,1%), пропорциональное скорости двигателя;

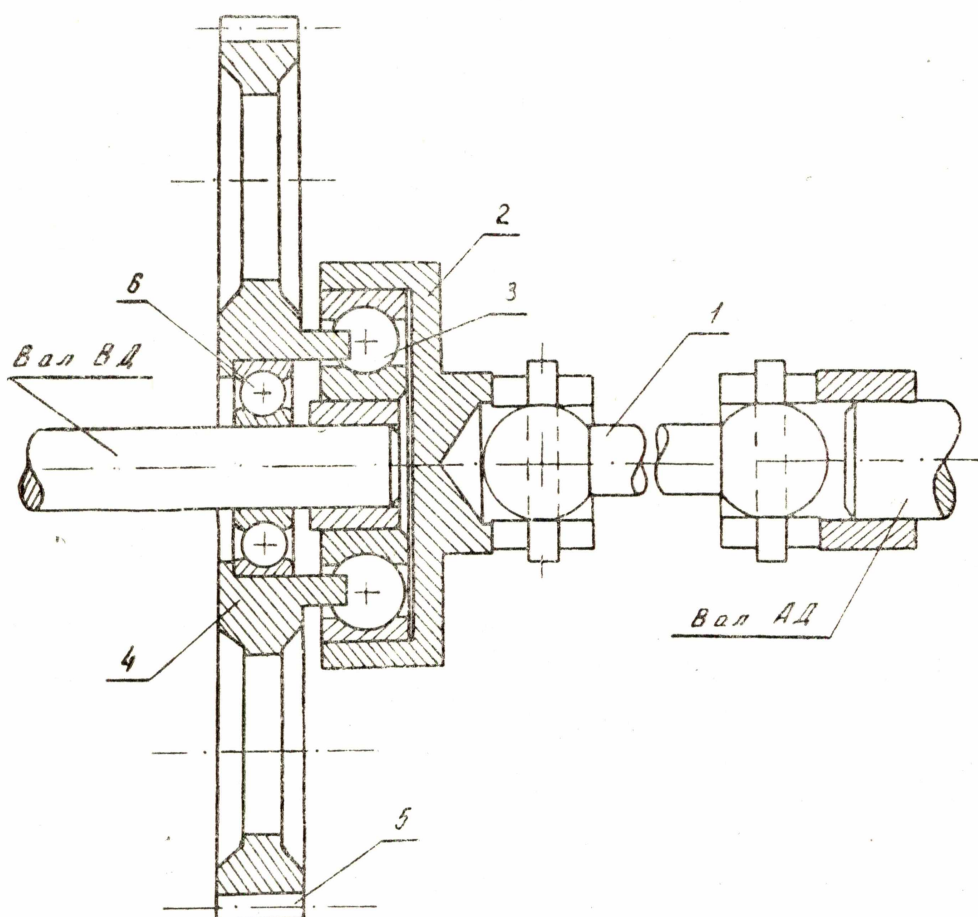


Рис. 5.

2) благодаря применению напряжения с частотой 1000 гц после выпрямления оказалось возможным применить сглаживающий фильтр с очень малой инерционностью;

3) высокая точность дифференцирования получается благодаря малой постоянной времени дифференцирующей цепочки. При емкости $C = 0,5 \text{ мкф}$ и сопротивлении $R = 20 \text{ ком}$, постоянная времени дифференцирующей цепочки равна

$$T_c = R \cdot C = 20 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} = 0,01 \text{ сек.}$$

При этой постоянной времени уже после 0,03 сек точность дифференцирования достигает 5%¹⁾;

4) установка имеет небольшие габариты и вес, собирается из доступных материалов;

5) установка нечувствительна к вибрациям двигателя. Определить масштаб момента при снятии механической характеристики можно путем сравнения с пусковым моментом двигателя, который измеряется при помощи рычага и пружинного динамометра (рис. 6)

$$M_n = P \cdot l, \text{ кгМ},$$

где P — показание динамометра, кгГ;

l — плечо, м.

Этот пусковой момент сравнивается с отклонением луча осциллографа по оси ускорения при скорости двигателя, равной нулю. Если измеренное отклонение равно x_0 , мм, то масштаб момента определяется по формуле

$$\mu_M = \frac{M_n}{x_0}, \frac{\text{кгМ}}{\text{мм}}. \quad (16)$$

Момент двигателя на других участках осциллограммы определяется по формуле

$$M_i = x_i \mu_M = x_i \frac{P \cdot l}{x_0}, \text{ кгМ}, \quad (17)$$

где x_i — отклонение луча осциллографа при скорости ω_i . Относительная погрешность при определении момента рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{\Delta x_i}{x_i} + \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta x_0}{x_0}. \quad (18)$$

Если принять, что входящие в формулу (18) величины определены с относительной погрешностью в 2%, то относительная погрешность при измерении момента не будет превышать $8 \div 10\%$.

В установке использован осциллограф ЭО-7 с электронно-лучевой трубкой 13ЛО36В (с послесвечением). В качестве вспомогательного двигателя ВД применен трехфазный асинхронный двигатель ДТ-75, 75 Вт, 2800 об/мин.

При изготовлении шарикоподшипникового дифференциала использован шарикоподшипник № 202.

1) Решение уравнения (6) имеет вид

$$i = C \frac{dU_{m2}}{dt} (1 - e^{-\frac{t}{T_c}}).$$

Точность дифференцирования определяется двучленом $(1 - e^{-\frac{t}{T_c}})$. Легко подсчитать, что $(1 - e^{-\frac{t}{T_c}}) = 0,95$ уже при времени $t = 0,03$ сек.

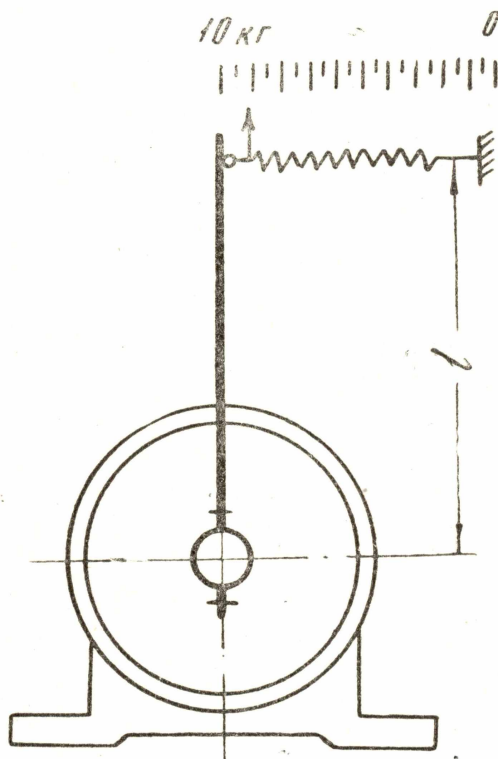


Рис. 6.

В качестве тахогенератора взят асинхронный двухфазный двигатель с полым немагнитным ротором ЭМ-8.

Установка может быть использована машиностроительными заводами при серийном испытании асинхронных двигателей, а также научно-исследовательскими лабораториями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Н. Синельников, Г. С. Сомихина. Измерение вращающих моментов асинхронных двигателей при разбеге. Электричество, 1950, № 7.

2. Fetter F., Basta J. Novepoznatky o mereni zrychleni pomoci dynama. Sbornik II. Vedecke konference F. S. I., Прага, 1958 (см. журнал Центрального института научно-технической информации электротехнической промышленности и приборостроения, серия ТС-1, П-5954, Москва, 1961).

3. Führer H. und Waldmann L. Ein einfaches Verfahren zur Aufnahme der Drehmomenten—Drehzahlkennlinie von Asynchronmotoren, Elektrotechnik und Maschinenbau, № 1, 1962.

4. В. А. Глебов. Экспериментальное исследование пусковых процессов асинхронных двигателей. Электричество, № 12, 1956.

Поступила в редакцию
в мае 1962 г.