

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ПРИСОЕДИНЕННОГО МАХОВИКА, ИСКЛЮЧАЮЩЕГО ВЛИЯНИЕ УСКОРЕНИЯ НА ИЗМЕРЕНИЕ КРИВОЙ МОМЕНТОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Шарабан Ю.В.

Харьковское агрегатное конструкторское бюро, Украина, Харьков

Финкельштейн В.Б., д.т.н., проф.

Харьковская национальная академия городского хозяйства, г. Харьков, Украина

*Наведено метод розрахунку моменту інерції маховика, присоединеного до вала асинхронного двигуна, що виключає вплив прискорення на вимірювання кривої моменту. Зазначений метод реалізований при знятті характеристик високошвидкісних двигунів при розгоні на експериментальній установці.*

*Приведен метод расчета момента инерции маховика, присоединенного к валу асинхронного двигателя, исключаяющего влияние ускорения на измерение кривой момента. Указанный метод реализован при снятии характеристик высокоскоростных двигателей при разгоне на экспериментальной установке.*

При исследовании параметров электродвигателя важно определить его механическую характеристику. Существует несколько способов экспериментального определения механической характеристики – статические, основанные на измерении момента статической нагрузки  $M_C$  при  $\frac{d\omega}{dt} = 0$  и динамические, основанные на измерении динамического момента  $M_d$  при  $M_C \approx 0$ .

Экспериментальное определение вращающих моментов высокоскоростных (8...12 тысяч оборотов в минуту) асинхронных двигателей в процессе разгона представляет значительные трудности – отсутствует стандартное оборудование, которое позволило бы непосредственно производить запись зависимости  $M = f(n)$ .

Поэтому определение кривой вращающего момента (КВМ) высокооборотных авиационных асинхронных электродвигателей (АД) целесообразно осуществлять при разбеге с присоединенным маховиком (ПМ) [1].

В момент включения АД присутствует аperiodическая составляющая момента, которая обуславливает его пульсацию. В момент пуска АД в обмотках статора и ротора присутствует периодический и аperiodический токи [2].

Электромагнитное взаимодействие этих токов с магнитным полем создает результирующий вращающий момент, который действует в начальный период пуска. При увеличении вращения ротора этот момент изменяется. Основная составляющая момента обусловлена взаимодействием вращающегося магнитного поля, созданного суммой установившихся свободных токов ( $i_0 = i_1 + i_2$ ) с установившимся током  $i_{2y}$  (ротора). Указанный момент является статическим моментом двигателя.

При разгоне АД магнитные поля от присутствующих в обмотках статора и ротора свободных токов создают пульсирующий знакопеременный момент (переходный). После разгона двигателя и затухания

свободных токов в роторе и статоре исчезает аperiodическая составляющая и в двигателе действует только статический вращающий момент.

Индуктивное сопротивление АД изменяется из-за насыщения стали и демпфирования, а активное сопротивление – из-за вытеснения тока в стержнях ротора. При пуске АД основной магнитный поток уменьшается по сравнению с номинальным режимом из-за падения напряжения в обмотке статора, обусловленного пусковым током. Поля аperiodических токов могут усиливать или ослаблять результирующий момент (пики и провалы в кривой момента).

После достижения критического скольжения разгон электродвигателя без ПМ происходит при значительном угловом ускорении ротора. Под влиянием ускорения снижение величины тока значительно отстает от уменьшения скольжения. При этом может возникнуть такое положение, при котором частота вращения ротора будет равна синхронной, но токи в обмотках статора и ротора не будут равны нулю. Будет создаваться некоторый вращающий момент, который вызовет увеличение частоты вращения ротора выше синхронной.

Для определения статической КВМ момент инерции ПМ должен быть таким, чтобы ускорение при разбеге было достаточно малым и, практически, не оказывало влияния на точность определения КВМ, но в то же время он должен быть минимально необходимым для ограничения длительности работы при пусковых токах. Такое значение момента инерции определяется из ряда решений системы [3] нелинейных дифференциальных уравнений, описывающей динамические процессы в асинхронных машинах при различных величинах момента инерции  $J$ .

$$\begin{cases} \frac{d\psi_s}{dt} = u_s - \left( \frac{R_s}{L'_s} + j\omega_k \right) \psi_s + k_r \frac{R_s}{L'_s} \psi_r \\ \frac{d\psi_r}{dt} = k_s \frac{R_r}{L'_r} \psi_s - \left[ \frac{R_r}{L'_r} + j(\omega_k - \omega) \right] \psi_r \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1,5 \frac{k_r}{L'_s} \cdot \text{Im}(\psi_r * \psi_s)}{J} \end{cases} \quad (1)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ;  $L'_r, L'_s$  – приведенные результирующие индуктивности ротора и статора соответственно;  $R_r, R_s$  – активные сопротивления ротора и статора соответственно;  $\psi_s, \psi_r$  – векторы потокоцеплений статора и ротора соответственно;  $u_s$  – вектор напряжения статора;  $\omega, \omega_k$  – угловые скорости вращения ротора и системы координат в электрических радианах;  $t$  – время;  $k_r, k_s$  – коэффициенты связи ротора и статора.

Разработана программа расчета механической характеристики АД с учетом углового ускорения.

Вышеприведенные уравнения интегрируются методом Рунге-Кутты в синхронно вращающейся системе координат.

В результате расчета получаем для каждого конкретного АД такую минимальную величину  $J_{\min}$ , при которой достигается максимальная сходимость статических и динамических КВМ (наибольшее расхождение этих кривых в зоне  $M_{\max}$ , т.к. в этой зоне ускорение  $\frac{d\omega}{dt} = \max$ ).

Например, для АД напряжением 115/200 В, частотой 400 Гц, мощностью 3 кВт, и частотой вращения 8000 об/мин (ДА-3) расчетная КВМ представлена на рис. 1 (апериодическая составляющая затухает в течение 0,07 с).

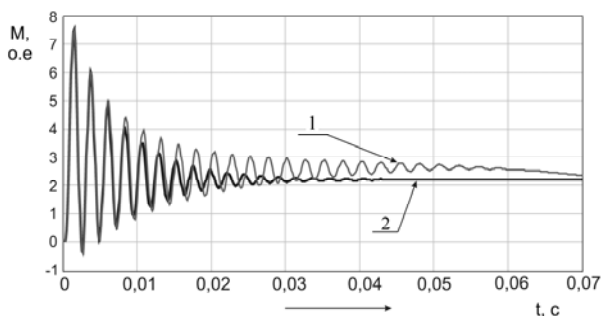


Рис. 1. Зависимость момента электродвигателя от времени  
1 – кратность момента двигателя без маховика,  
2 – кратность момента двигателя с маховиком

На рис. 2 приведена механическая характеристика двигателя мощностью 110 кВт.

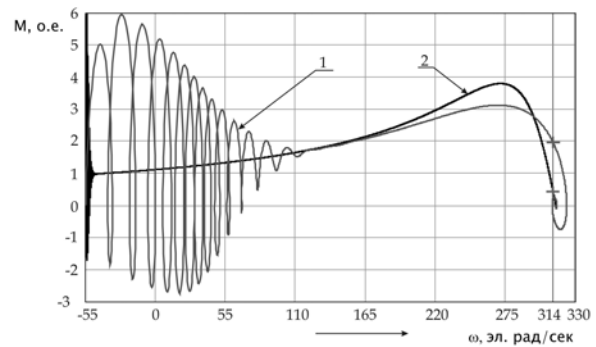


Рис. 2. Механическая характеристика двигателя  
1 – механическая характеристика двигателя без маховика;  
2 – механическая характеристика двигателя с присоединенным маховиком

Чтобы исключить влияние апериодических составляющих на механическую характеристику и более точно определить величину пускового момента, необходимо осуществлять реверс АД с затухшим магнитным полем ротора, т.е. производить разбег АД с отрицательной скоростью вращения.

Разработанная программа позволяет также определить такую величину отрицательной скорости, до которой необходимо разогнать двигатель с присоединенным маховиком, чтобы при разгоне с  $n = 0$  в обратную сторону исключить апериодическую составляющую и пульсации момента. Так для двигателя ДА-3 расчетная величина отрицательной скорости составляет 1570 эл. рад/сек. (5000 об/мин) (рис. 3).

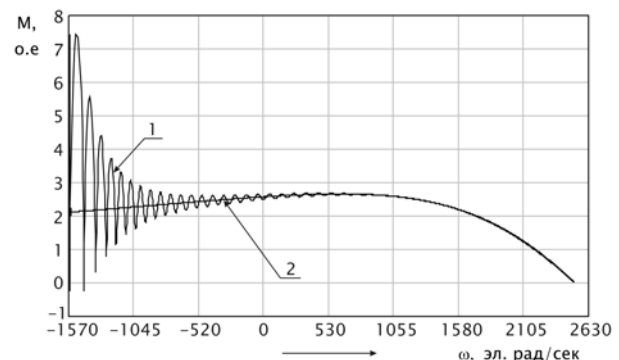


Рис. 3. Механическая характеристика двигателя  
1 – кратность момента двигателя без маховика,  
2 – кратность момента двигателя с маховиком

На рис. 4 приведен график изменения приращенного момента при различном моменте инерции ротора с присоединенным маховиком для асинхронного двигателя мощностью 110 кВт.

Момент инерции ротора без присоединенного маховика  $J_p = 3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  принят за одну относительную единицу, максимальный момент инерции – момент инерции двигателя с маховиком,  $J_{\max} = 120 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Отличие динамического момента от статического рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta M (\%) = \frac{M_{\max} - M_p}{M_p} \cdot 100\%$$

где  $M_{\max}$  – момент двигателя с присоединенным маховиком;  $M_p$  – момент ротора двигателя.

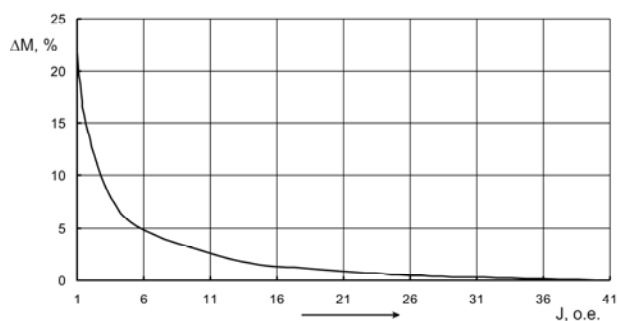


Рис. 4. График изменения приращения момента при различном моменте инерции ротора с присоединенным маховиком

Для экспериментального определения механических характеристик двигателей в процессе разгона с присоединенным маховиком была спроектирована и изготовлена установка (рис. 5).

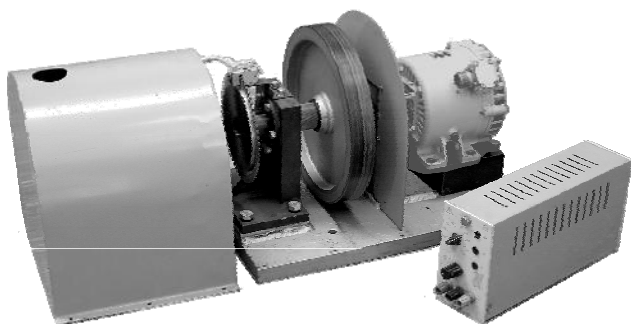


Рис. 5. Установка для снятия механической характеристики АД

Для измерения скорости и вращающего момента применяется одно измерительное устройство (рис. 6).



Рис. 6. Схема измерительного устройства

Момент определяется по производной по времени от скорости вращения (дифференцирование выходного напряжения преобразователя частоты вращения).

На рис. 7 и рис. 8 приведены экспериментальные и расчетные кривые изменения во времени частоты вращения и момента электродвигателя.

Различие между расчетной и опытной кривой обусловлено отличием расчетных и фактических значений активных и индуктивных сопротивлений.

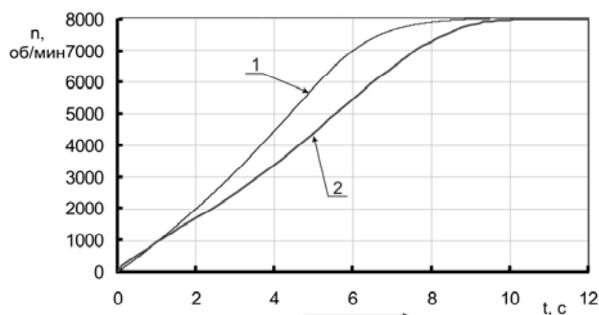


Рис. 7. Изменение частоты вращения двигателя при пуске 1 – расчетная кривая, 2 – экспериментальная кривая

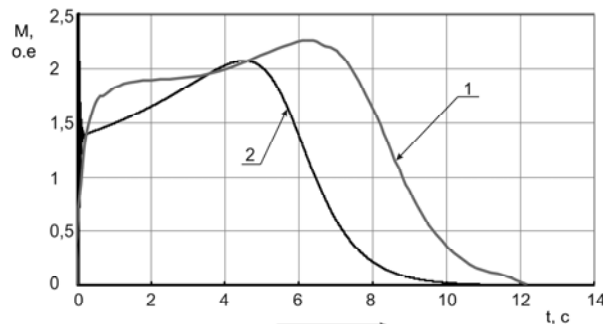


Рис. 8. Зависимость момента электродвигателя от времени 1 – экспериментальная зависимость, 2 – расчетная зависимость

## ВЫВОДЫ

1. Существующие стандартные устройства и приборы не позволяют определять и производить запись механической характеристики высокоскоростных авиационных АД
2. Известный метод измерения вращающего момента АД по ускорению является наиболее целесообразным при измерении с известной добавочной инерционной массой.
3. Имеется возможность получать максимальную сходимость статической и динамической КВМ путем определения соответствующего значения момента инерции ПМ.
4. Разработанная установка для снятия КВМ при разбеге АД с ПМ за счет малого ускорения и с отрицательной скорости дает возможность быстро и достоверно получить реальную характеристику АД при испытаниях в мелкосерийном производстве.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Синельников Е.М., Сомихина Г.С. Измерение вращающих моментов асинхронных двигателей при разбеге // Электричество.–1950, №7.–С. 46-50.
- [2] Петров Г.Н. Электрические машины., ч.2, - М.Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.
- [3] Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.Л.: Госэнергоиздат, 1963.–744 с.

Поступила 04.04.2006