

ПУЛЬСИРУЮЩИЙ МОМЕНТ И ГЕОМЕТРИЯ ОДНОФАЗНЫХ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Известно, что в однофазных электрических машинах электромагнитный момент в первом приближении изменяется во времени по закону [1, 2, 3]:

$$M = \frac{E_m I_m}{2n} \cos \varphi - \frac{E_m I_m}{2n} \cos(2\omega_1 t - \varphi). \quad (1)$$

Здесь и далее приняты следующие обозначения:

- A — линейная нагрузка,
- B_δ — индукция в воздушном зазоре,
- D — диаметр воздушного зазора,
- G — вес,
- E_m — амплитуда э. д. с.,
- I_m — амплитуда тока,
- J_p — момент инерции ротора,
- J_{cm} — момент инерции статора,
- l — линейный размер машины,
- M — крутящий момент,
- M_{an} — амплитуда пульсирующего момента,
- n — скорость вращения,
- p — число пар полюсов,
- P_2 — номинальная мощность на валу,
- P' — расчетная мощность машины,
- t — время,
- ω_1 — круговая частота сети,
- φ — угол сдвига фаз тока и напряжения,
- η — коэффициент полезного действия.

Первый член уравнения (1) $\frac{E_m I_m}{2n} \cos \varphi$ представляет среднее значение момента, определяемое нагрузкой на валу. Второй член $\frac{E_m I_m}{2n} \cos(2\omega_1 t - \varphi)$ представляет пульсирующий момент двигателя, частота которого равна удвоенной частоте сети.

Пульсирующий момент вызывает крутильные колебания статора с этой частотой, которые передаются на фундамент, являясь причиной так называемого структурного шума. Так как пульсирующий момент

приложен в той же степени и к ротору, то ротор тоже совершает вынужденные крутильные колебания относительно координат, вращающихся со скоростью, равной средней скорости ротора. Наличие крутильных колебаний вращающегося ротора—это, иначе говоря, колебания скорости ротора с частотой, равной удвоенной частоте сети.

Непостоянство скорости ротора вызывает появление высших гармонических пульсирующего момента, а следовательно, и вибраций статора, им вызываемых. Крутильные колебания ротора тоже содержат высшие гармоники. Указанные колебания ротора и статора вызывают шум и вибрации с частотами $2\omega_1, 4\omega_1, 6\omega_1, 8\omega_1$ и т. д. Амплитуды высших гармоник колебаний скорости и вибраций статора зависят от тангенса угла наклона кривой $M_{an} = f(n)$ (рис. 1). Вес высших гармоник, как видно из рис. 1, пропорционален величине изменения амплитуды пульсирующего момента ΔM_{an} при пульсирующем изменении скорости в диапазоне $2\Delta n$. Выяснено, что вес высших гармоник пульсирующего момента и вибраций, им вызываемых, существенно зависит от размеров отрезка характеристики ab двигателя, в пределах которого колеблется скорость ротора [4].

Нас интересует в этом случае величина проекции этого отрезка характеристики на ось момента, т. е. ΔM_{an} . Чем больше ΔM_{an} за один период изменения питающего напряжения, тем выше вес высших гармоник [4]. При постоянном Δn , определяемом амплитудой пульсирующего момента, частотой сети и моментом инерции ротора, ΔM_{an} зависит исключительно от тангенса угла наклона кривой $M_{an} = f(n)$. Строго говоря, на Δn оказывает небольшое влияние и момент инерции статора. Дело в том, что угол колебаний ротора должен отсчитываться не относительно неподвижных координат, а относительно координат, расположенных на статоре, который, как известно, отклоняется в противоположную сторону на некоторый угол, величина которого обратно пропорциональна моменту инерции статора. Но так как момент инерции статора в 10—15 раз больше момента инерции ротора, то этим углом мы имеем право пренебречь.

С другой стороны, при той же самой кривой $M_{an} = f(n)$ диапазон изменения амплитуды пульсирующего момента зависит от диапазона изменения скорости $2\Delta n$ (рис. 2).

Амплитуда угловых колебаний ротора определяется формулой

$$\Delta \alpha_p \equiv \frac{M_{an}}{J\omega_1} \quad (2)$$

Известно, что с изменением номинальной мощности и номинальной скорости M_{an} и J изменяются по различным законам. Поэтому представляется интересным проанализировать, как будет изменяться $\Delta \alpha_p, \Delta n$ и в конечном счете ΔM_{an} в зависимости от номинальной мощности двигате-

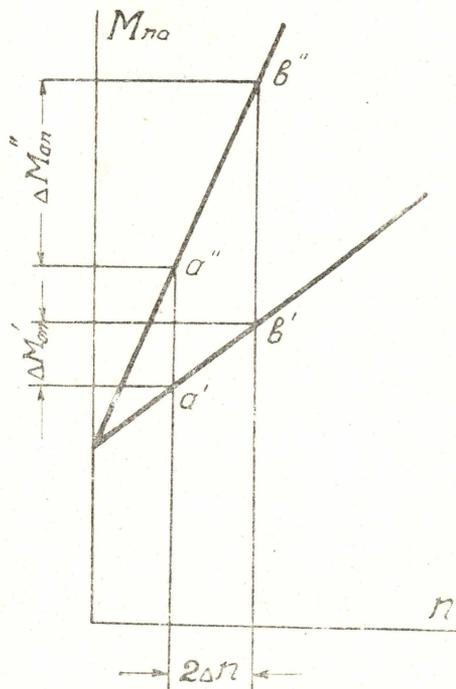


Рис. 1.

ля. Из формулы (2) следует, что для определенного числа полюсов асинхронного двигателя отношение $\frac{M_{an}}{J_p}$ определяет амплитуду угловых колебаний ротора, диапазон изменения скорости $2\Delta n$ и, следовательно, вес высших гармонических.

Целью настоящей работы является анализ влияния номинальной мощности однофазного асинхронного двигателя на вес высших гармонических пульсирующего момента и вибраций. Кроме того, ставится задача выяснить зависимость амплитуды вибраций, вызываемых основной гармоникой, от номинальной мощности машины.

Амплитуда пульсирующего момента в синхронных ваттах численно равна так называемой расчетной мощности (2)

$$M_{na} = IE = P' = \frac{P_{2H}}{\eta_H \cos \varphi_H} \quad (3)$$

Так как в каталогах и справочниках обычно фигурирует не расчетная мощность P' , а номинальная мощность на валу P_{2H} , то рассмотрим по отдельности следующие функциональные зависимости:

$$M_{an} = P' = f_1 \left(P_{2H}, \frac{\omega_1}{p} \right),$$

$$J = f_2 \left(P_{2H}, \frac{\omega_1}{p} \right). \quad (4)$$

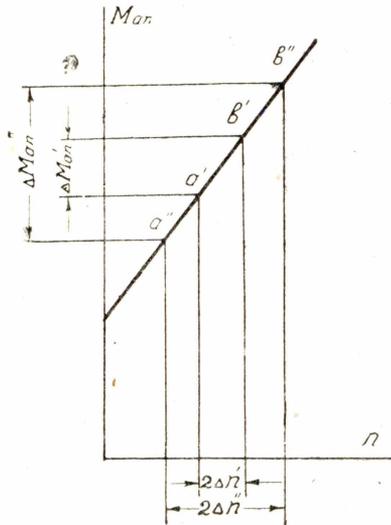


Рис. 2.

Для ряда геометрически подобных машин при постоянстве синхронной скорости (числа полюсов) расчетная мощность, численно равная амплитуде пульсирующего момента, зависит от линейного размера машины следующим образом (5):

$$M_{an} = p' \equiv l^4. \quad (5)$$

Для однотипных машин, имеющих различное число полюсов, справедлива зависимость

$$M_{an} \cdot n \equiv P' \equiv l^4 n. \quad (6)$$

Однако следует иметь в виду, что формулы (5) и (6) действительны только при условии постоянства электромагнитных загрузок машины, т. е. при $A = \text{const}$ и $B_\delta = \text{const}$. В действительности же электромагнитные загрузки машины выбираются в зависимости от номинальной мощности. Особенно сильно электромагнитные загрузки меняются в области малых мощностей, т. е. для машин, которые являются предметом настоящего рассмотрения. Для машин мощностью до 600 вт И.С. Сергеев [5] дает следующую зависимость произведения электромагнитных загрузок от диаметра воздушного зазора и скорости машины

$$AB_\delta \equiv D^\alpha n^\beta, \quad (7)$$

где $\alpha \approx 1$,

$\beta \approx 0,2 \dots 0,3$.

Иначе говоря, при $n_c = \text{const}$ произведение электромагнитных нагрузок прямо пропорционально линейному размеру машины:

$$AB_\delta \equiv l^1. \quad (8)$$

В этом случае зависимость амплитуды пульсирующего момента от линейного размера машины выразится следующим образом:

$$M_{na} = P' \equiv l^5. \quad (9)$$

Вернемся к формуле (2) и рассмотрим величину угловых колебаний статора и ротора и диапазон изменения скорости ротора с учетом уточнения (9). Как известно, момент инерции J пропорционален маховому моменту

$$J \equiv \frac{GD^2}{4}. \quad (10)$$

Приняв во внимание, что

$$G \equiv l^3,$$

$$D \equiv l, \quad (11)$$

получим

$$J \equiv l^5. \quad (12)$$

Поделив (9) на (12), получим, что угловая амплитуда колебаний статора и ротора и диапазон изменения скорости ротора от действия пульсирующего момента остаются постоянными в широком диапазоне мощностей:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{ct} &\equiv l^0, \\ \Delta\alpha_p &\equiv l^0, \\ \Delta n &\equiv l^0. \end{aligned} \quad (13)$$

Амплитуда линейных колебаний статора, очевидно, выразится зависимостью

$$a = \Delta\alpha_{ct} \cdot R \equiv l^1, \quad (14)$$

где R — расстояние от данной точки статора до центра машины.

Анализируя выражения (13, 14), можно отметить следующее.

1. Амплитуды угловых колебаний статора и ротора, вызванных пульсирующим моментом, в рассматриваемом диапазоне мощностей не зависят от номинальной мощности машины.

2. Диапазон изменения скорости ротора при его пульсирующем движении также не зависит от номинальной мощности. Следовательно, вес высших гармоник пульсирующего момента и вибраций одинаков для машин различной мощности и определяется исключительно величиной рабочего скольжения, т. е. тангенсом угла наклона характеристики.

3. Линейная амплитуда вибраций статора при изменении номинальной мощности прямо пропорциональна линейному размеру машины.

Для подтверждения полученных выводов были проанализированы соотношения, имеющие место в существующих двигателях, выпускаемых в Советском Союзе (единая серия АОЛБ) и в ФРГ (DA—фирма AEG, MD—фирма Siemens и AD—фирма Sachsenwerk). На рис. 3,

4, 5 представлены зависимости веса, к.п.д. и коэффициента мощности от номинальной мощности для четырехполюсных микродвигателей указанных типов. Данные заимствованы из [6].

Для представления зависимостей, показанных на рис. 3, 4, 5, в аналитической форме изберем показательную функцию, так как она

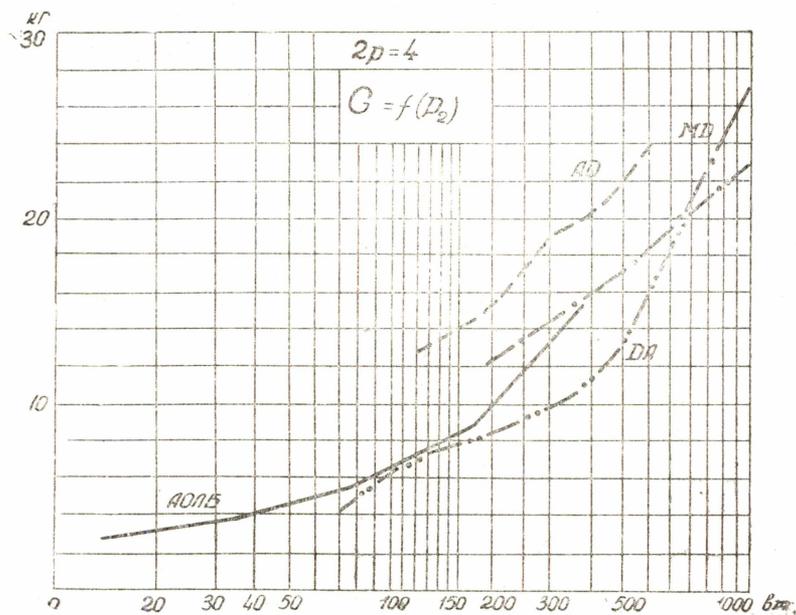


Рис. 3.

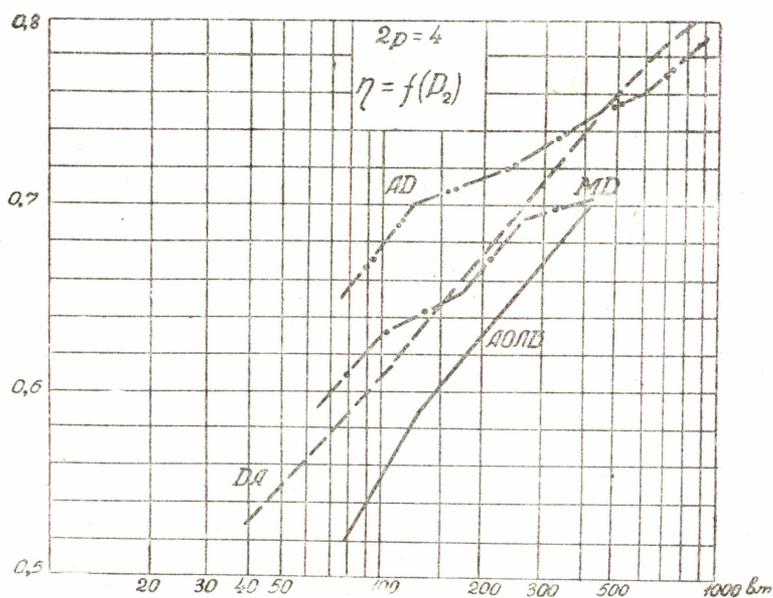


Рис. 4.

обычно применяется в такого рода выкладках и наиболее подходит к нашему анализу:

$$\begin{aligned}
 G &\equiv P_{2H}^x, \\
 \eta_H &\equiv P_{2H}^y, \\
 \cos\varphi_H &\equiv P_{2H}^z.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Построив огибающие зависимостей на рис. 3, 4, 5 и проведя средние кривые (на рисунках они не показаны во избежание затемнения чертежей), путем подбора найдем такие значения показателей степени x , y и z , чтобы кривые (15) совпали с какой-то точностью с упомянутыми средними кривыми.

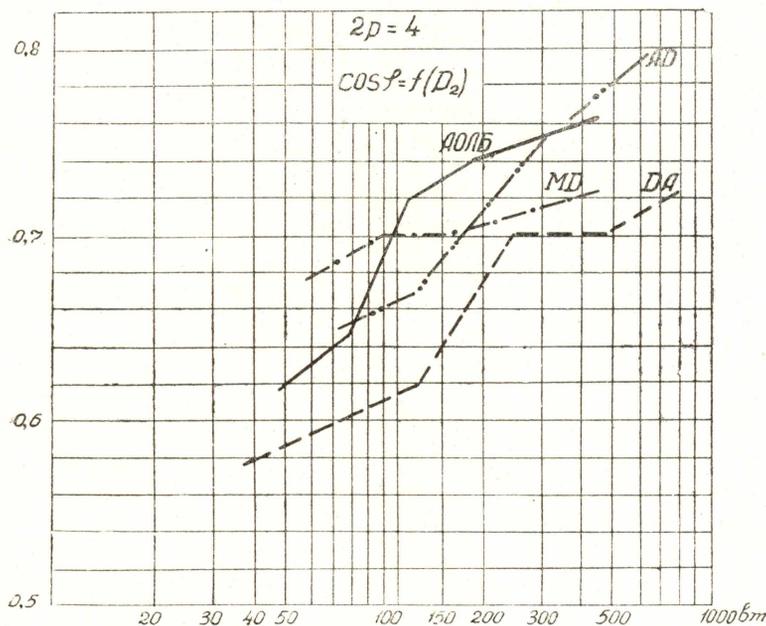


Рис. 5.

В результате подбора мы получили следующие значения показателей степени

$$x = 0,45, \quad y = 0,143, \quad z = 0,11.$$

Подставив полученные значения x , y и z в формулу (15), получим:

$$\begin{aligned} G &\equiv P_{2H}, \\ \eta_H &\equiv P_{2H}, \\ \cos \varphi_H &\equiv P_{2H}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставив соотношения (16) в выражения (3), (12) и (2), получим:

$$\Delta \alpha_{ст} \equiv \Delta \alpha_p \equiv P_{2H}^0, \quad (17)$$

то есть амплитуда угловых колебаний статора и ротора остается постоянной в широком диапазоне мощностей. Выражение (17) эквивалентно выражению (13). Таким образом, можно сказать, что положения, полученные нами с учетом зависимости электромагнитных нагрузок от мощности, справедливы для реально существующих машин.

Выводы

1. В однофазных асинхронных двигателях малой мощности амплитуда угловых колебаний статора и ротора, возникающих под действием пульсирующего момента, постоянна в широком диапазоне номинальных мощностей.

2. Диапазон изменения скорости ротора при пульсирующем движении его также не зависит от номинальной мощности.

3. Вес высших гармоник пульсирующего момента и вызываемых им вибраций не зависит от мощности двигателя и определяется исключительно величиной рабочего скольжения, т. е. тангенсом угла наклона характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. L. Kimball, P. L. Alger, Single—Phase Motor—Torque Pulsation, Tr. A. I. E. E., vol. 43, pp. 730—739, 1924.
2. K. P. Kovacs, Pulsierendes Moment im asymmetrischen Betrieb von Wechselstrom - maschinen, A. i. E., Bd. 42, H. 2, 1955.
3. R. Beach. Physical Conceptions of Single—Phase Induction Motor Performance, Electrical Engineering, vol. 63, № 7, pp. 254—263, 1943.
4. Э. К. Стрельбицкий. Пульсирующий момент однофазных электрических машин, Известия высших учебных заведений сб. Электромеханика, №9, 1959.
5. П. С. Сергеев. Проектирование электрических машин, ГЭИ, 1956.
6. Обзор зарубежной техники №14/131 Электрические двигатели малой мощности, ЦБТИ ЭП, 1958.