

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕСЩЕТОЧНЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ  
ФОРМЕ ЭДС**

Э. Р. Гейнц, Ю. Н. Кронеберг

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Как известно, одна из основных особенностей бесщеточных двигателей постоянного тока связана с несинусоидальной формой фазных напряжений. При несинусоидальном поле ротора это приводит к появлению дополнительных вращающихся и пульсирующих моментов. Исследования показывают [1, уравнение (18)], что высшие временные гармоники тока, увеличивая потребляемую мощность, далеко не всегда создают соответствующее увеличение полезного момента (за счет более низкого коэффициента полезного действия, а также вследствие встречного действия некоторых гармоник).

Определим условия благоприятного сочетания форм фазных тока и эдс для нейтральной коммутации ( $\gamma_0 = \frac{\pi}{2}$ ). В соответствии с полученными ранее уравнениями [1, уравнения (18) и (19)] коэффициенты полезного действия первой гармоники, гармоник, создающих прямые и обратные вращающиеся, а также пульсирующие поля, описываются выражениями:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{M_{вр 1} \Omega}{P_{1потр 1}} = \frac{\Omega}{\Omega_0} = \nu, \\ \eta_{(2mn+1)} &= \nu \frac{E_{M(2mn+1)} U_{M1}}{E_{M1} U_{M(2mn+1)}}, \\ \eta_{(2mn-1)} &= \nu \frac{E_{M(2mn-1)} U_{M1}}{E_{M1} U_{M(2mn-1)}}, \\ \eta_{[m(2n-1)]} &= \nu \frac{E_{M[m(2n-1)]} U_{M1}}{E_{M1} U_{M[m(2n-1)]}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где условные обозначения приняты в соответствии с [1].

Из уравнения (1) следует, что максимальный к.п.д. каждой гармоники и, следовательно, общий к.п.д. двигателя численно равны относительной скорости  $\nu$  (теоретически может достигать единицы). Для этого необходима полная идентичность форм фазных тока и эдс. При выполнении последнего условия к.п.д. и использование машины всегда будут одинаковы, независимо от содержания высших гармонических.

Форма фазного тока, естественно, определяется формой напряжения (схемой включения обмотки и скважностью к работы силовых элементов коммутатора), а также индуктивными сопротивлениями обмотки для каждой гармоники, величина которых зависит от скорости вращения. Поэтому форма тока в общем случае не остается постоянной и при увеличении скорости вращения происходит ее сглаживание и снижение состава высших гармонических. Исключение составляет только синусоидальная форма тока.

Форма фазной эдс определяется формой поля возбуждения, то есть спектром гармоник поля, и соответствующими обмоточными коэффициентами. Как известно, наиболее эффективными по использованию активных материалов в большинстве случаев являются двухслойные распределенные обмотки с укороченным шагом, характеризующиеся практически синусоидальными эдс даже при существенных искажениях поля. Сосредоточенные обмотки с диаметральной шагом, эдс которых содержат все печатные гармоники поля, в машинах переменного тока применяются главным образом по технологическим соображениям и имеют, как правило, худшее использование и повышенные реактивности. В целом же следует, что, несмотря на возможные исключения, наиболее рациональна для электрических машин синусоидальная эдс. С этих позиций представляет интерес проанализировать энергетические показатели бесщеточных двигателей постоянного тока с эдс синусоидальной формы.

При нейтральной коммутации с помощью полученных ранее уравнений моментов и мощностей [1, уравнения (18) и (19)], принимая без значительной погрешности  $X_p = X_0$ , находим общее выражение к.п.д. машины с синусоидальной эдс

$$\eta_{\Sigma} = \frac{M_{вр} \Omega}{P_{инотр.}} = \frac{\nu \frac{1 - \nu}{1 + \tau_0^2 \nu^2}}{\left\{ \frac{1 - \nu}{1 + \tau_0^2 \nu^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_{M(2mn+1)}^2}{U_{M1}^2 [1 + (2mn+1)^2 \tau_0^2 \nu^2]} + \right.} \rightarrow$$

$$\left. + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_{M(2mn-1)}^2}{U_{M1}^2 [1 + (2mn-1)^2 \tau_0^2 \nu^2]} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_{M[m(2n-1)]}^2}{U_{M1}^2 [1 + m^2 (2n-1)^2 \tau_0^2 \nu^2]} \right\}} \rightarrow$$
(2)

Для конкретных схем обмоток это выражение значительно упрощается. Так, при независимом питании фаз [1, рис. 1, а]

$$\eta_{\Sigma}^{(H)} = \frac{\nu \left[ \frac{1 - \nu}{1 + \tau_0^2 \nu^2} \right]}{\left\{ \frac{\pi^2}{8} \frac{k}{\sin^2 \frac{\pi}{2} - k} - \frac{\pi \tau_0 \nu}{4 \sin^2 \frac{\pi}{2} - k} \left[ \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi}{2\tau_0 \nu} (1-k) \operatorname{sh} \frac{\pi k}{2\tau_0 \nu}}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{2\tau_0 \nu}} \right] - \frac{\nu}{1 + \tau_0^2 \nu^2} \right\}}$$
(3)

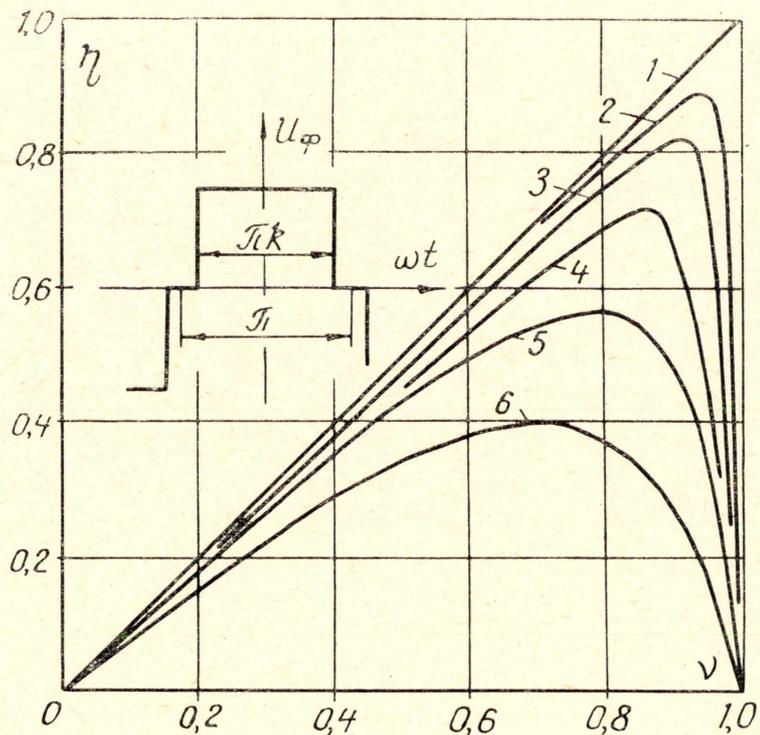
а при соединении обмоток машины «звездой» или «треугольником»

$$\begin{aligned} \eta_{\Sigma}^{(\nabla, \Delta)} = & \nu \left[ \frac{1 - \nu}{1 + \tau_0^2 \nu^2} \right] \\ = & \frac{\left\{ \frac{\pi^2}{36} \frac{(3k + 1)}{\sin^2 \frac{\pi}{2} k} - \frac{\pi \tau_0 \nu}{12 \sin^2 \frac{\pi}{2} k} \left[ \frac{3 \operatorname{ch} \frac{\pi(1-k)}{2\tau_0 \nu} \operatorname{sh} \frac{\pi k}{2\tau_0 \nu}}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{2\tau_0 \nu}} \right] \right\}}{\left\{ \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(1-k)}{2\tau_0 \nu} \operatorname{sh} \frac{\pi(3k-2)}{6\tau_0 \nu}}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{6\tau_0 \nu}} \right\} - \frac{\nu}{1 + \tau_0^2 \nu^2}} \end{aligned} \quad (4)$$

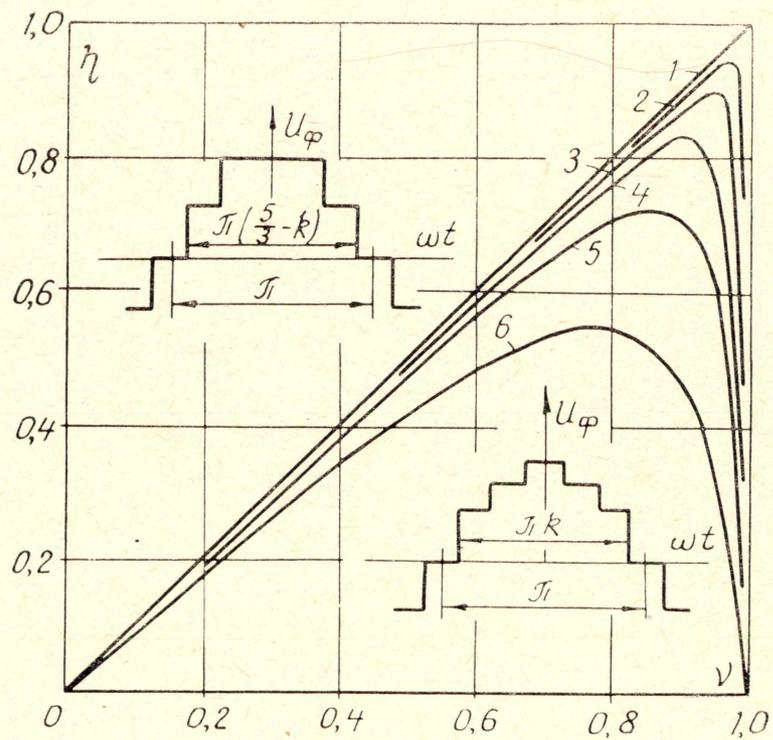
На рис. 1 представлены рассчитанные по уравнениям (3) и (4) зависимости к.п.д. от скорости вращения при различных значениях относительной индуктивности  $\tau_0 = \left( \frac{X_a}{R_s} - \frac{\Omega_0}{\Omega} \right)$  для рассматриваемых схем соединения обмоток. Там же приведена предельная кривая, полученная в предположении синусоидальности напряжения и тока, то есть при полной идентичности форм тока и э.д.с. Как следует из рис. 1, увеличение относительной индуктивности повышает к.п.д., что объясняется отфильтровыванием высших гармоник тока. Однако на основании этого еще нельзя сделать вывода о целесообразности увеличения  $\tau_0$  из-за одновременного снижения использования машины, которое достаточно полно можно охарактеризовать отношением полезной мощности для синусоидальных форм при заданном значении  $\tau_0$  ( $Q_{2(\tau_0 \neq 0)}$ ) к ее предельному значению при  $\tau_0 = 0$ . Это отношение может быть получено из уравнения момента [1, уравнение (18)] и описывается простой функцией

$$k_{Q_2} = \frac{Q_{2(\tau_0 \neq 0)}}{Q_{2(\tau_0 = 0)}} = \frac{1}{1 + \tau_0^2 \nu^2} \quad (5)$$

На рис. 2 и 3 представлены зависимости максимального к.п.д. и к.п.д. при максимальной полезной мощности от относительной индуктивности, т. е. к.п.д., практически ограничивающие рабочую область, а также зависимости коэффициента  $k_{Q_2}$  для относительных скоростей, соответствующих максимальным значениям к.п.д. и максимальным полезным мощностям. Эти кривые дают уже более полное представление о роли относительной индуктивности и позволяют по известной величине  $\tau_0$  (она в конечном счете определяется типом и размерами машины) оценить изменение к.п.д. Уже при  $\tau_0 \geq 0,5$  снижение к.п.д. вследствие некоторого несоответствия форм тока и э.д.с. становится несущественным и поэтому в данном случае синусоидальную форму э.д.с. можно считать оптимальной. Для меньших значений  $\tau_0$  необходимы, вероятно, дополнительные исследования, которые позволили бы сопоставить возможный выигрыш за счет лучшего приближения формы э.д.с. к форме тока с проигрышем, обусловленным получением несинусоидальной э.д.с. (например, можно



a)



b)

Рис. 1. К. п. д. бесщеточных двигателей. a — при независимом включении обмоток: 1 — идеальный случай; 2 —  $k=0,75$ ,  $\tau_c=1,0$ ; 3 —  $k=0,75$ ,  $\tau_0=0,5$ ; 4 —  $k=0,75$ ,  $\tau_0=0,2$ ; 5 —  $k=0,75$ ,  $\tau_0=0$ ; 6 —  $k=1,0$ ,  $\tau_0=0$ . б — при соединении фаз «звездой» либо «треугольником»: 1 — идеальный случай; 2 —  $k = \frac{5}{6}$ ,  $\tau_0=1,0$ ; 3 —  $k = \frac{5}{6}$ ,  $\tau_0=0,5$ ; 4 —  $k = \frac{5}{6}$ ,  $\tau_0=0,2$ ,

5 —  $k = \frac{5}{6}$ ,  $\tau_0=0$ ; 6 —  $k=1,0$ ,  $\tau_0=0$ .

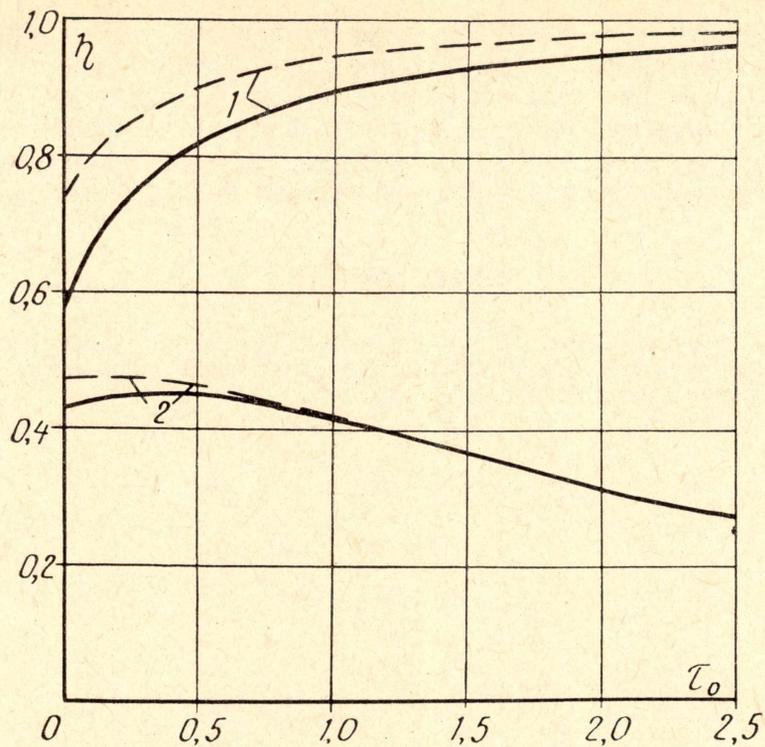


Рис. 2. Влияние относительной индуктивности на к. п. д.: 1 — для максимального к. п. д.; 2 — к. п. д. для максимальной полезной мощности; (— — — — независимое включение фаз, — — — — соединение фаз «звездой» либо «треугольником»)

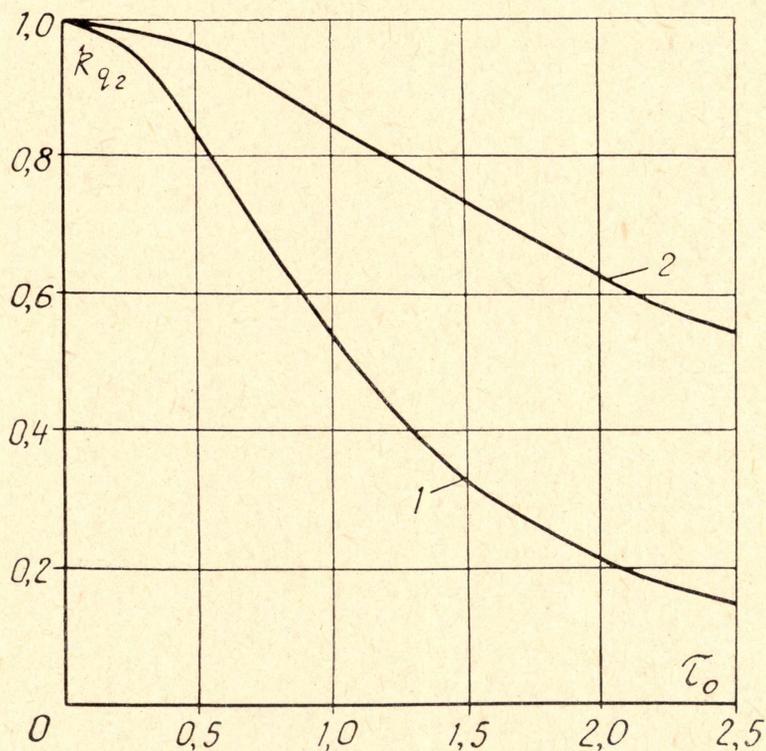


Рис. 3. Влияние относительной индуктивности на использование двигателей: 1 — для скорости, соответствующей максимальному к. п. д.; 2 — для скорости, соответствующей максимальной полезной мощности

проанализировать независимое включение сосредоточенных фазных обмоток с диаметральным шагом при прямоугольном поле возбуждения). Независимо от результатов этих исследований можно сделать вывод, что синусоидальная форма э.д.с. при использовании имеющихся средств приближения формы фазного тока к синусоидальной является одной из лучших, обеспечивающей высокие показатели бесщеточных двигателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Кронберг, Э. Р. Гейнд. Уравнение вращающего момента бесщеточных двигателей постоянного тока при несинусоидальном поле возбуждения. (Статья в настоящем сборнике).
-