

РАСЧЁТНАЯ МОЩНОСТЬ СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ВРАЩЕНИИ ЯКОРЯ

Ю. П. ЧИЖКОВ

Кафедра Автомобилей Будапештского Технического университета

Представлено: проф. д-ром З. Леван

Характерной особенностью режима пуска поршневого двигателя внутреннего сгорания от электрического стартера является высокая неравномерность вращения коленчатого вала [1]. Коэффициент неравномерности вращения валов автомобильных и тракторных двигателей при пусковых частотах от 2 до 20 1/с достигает значений 0,1—3,0.

Достаточно жесткая механическая связь стартера и двигателя обуславливает вращение якоря стартерного электродвигателя с той же степенью неравномерности. Данные экспериментального исследования ряда двигателей автотракторного типа позволяют представить зависимость частоты вращения якоря ω от времени t в виде синусоидальной функции (рис. 1):

$$\omega = \omega_{cp} \left(1 - \frac{\delta}{2} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right), \quad (1)$$

где $\omega_{cp} = \frac{\Theta}{T}$ — средняя частота вращения якоря; δ — период изменения функции $\omega(t)$; Θ — угол поворота якоря за период T .

Интегрируя (1), получим выражение для угла поворота якоря:

$$\begin{aligned} \varphi &= \int \omega dt = \omega_{cp} \int \left(1 - \frac{\delta}{2} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right) dt = \\ &= \omega_{cp} t - \frac{\delta T}{4\pi} \omega_{cp} \left(1 - \cos 2\pi \frac{t}{T} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнениями (1) и (2) параметрически задана функция $\omega(\varphi)$, вид которой при различных коэффициентах δ показан на рис. 1.

Каждому мгновенному значению частоты вращения в зависимости от формы механической характеристики электродвигателя соответствует определённый вращающий момент M . Форма механической характеристики определяется типом электродвигателя и способом его возбуждения.

На автомобилях и тракторах в качестве стартерных применяются электродвигатели с последовательным и смешанным возбуждением.

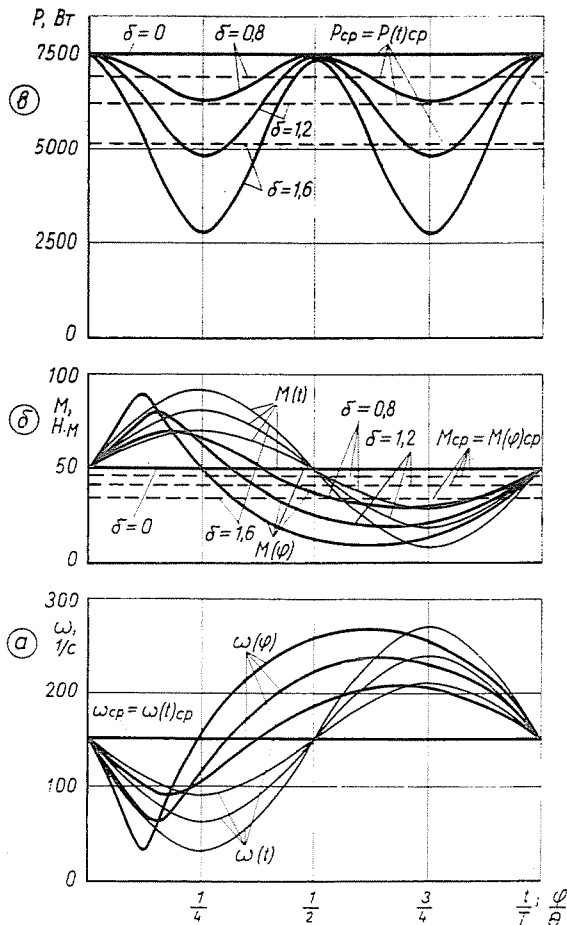


Рис. 1. Изменение частоты вращения (а), вращающего момента (б) и мощности (в) электродвигателя с линейной механической характеристикой по времени и углу поворота якоря при различных коэффициентах неравномерности

Магнитная система электродвигателей с последовательным возбуждением при малых нагрузках ненасыщена, магнитный поток пропорционален току якоря и механическая характеристика представляет собой гиперболу. Гиперболическая функция вида $M = \frac{c}{\omega}$ (где c — постоянная величина) даёт постоянное значение мощности $P = M\omega = c$, поэтому при любом характере изменения частоты вращения относительно своего среднего значения работа L , совершаемая стартерным электродвигателем за период T и, следовательно, действующий вращающий момент, являющийся средним по углу поворота, не зависит от коэффициента δ :

$$M_{cp} = M(\varphi)_{cp} = \frac{\mathcal{E}}{\Theta} = \frac{1}{\Theta} \int_0^T P dt = \frac{c}{\omega_{cp}} = \frac{P}{\omega_{cp}}. \quad (3)$$

С увеличением нагрузки на электропровод магнитная система электродвигателя насыщается, магнитный поток изменяется незначительно и механическая характеристика близка по форме к прямой вида:

$$M = a - b\omega, \quad (4)$$

где a и b — постоянные коэффициенты. В этом случае функции $M(t)$ и $M(\varphi)$ в определенном масштабе, но как-бы в зеркальном отражении, повторяют картину изменения функций $\omega(t)$ и $\omega(\varphi)$ (рис. 1). Площади, охватываемые функциями $M(t)$, при всех δ неизменны, тогда как площади, ограниченные кривыми $M(\varphi)$ и $P(t)$ и соответствующие производимой электродвигателем за период T работе, с увеличением δ заметно уменьшаются:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \int_0^T P dt = \int_0^T (a - b\omega) \omega dt = \\ &= \int_0^T \left[a - b\omega_{cp} \left(1 - \frac{\delta}{2} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right) \right] \cdot \omega_{cp} \left(1 + \frac{\delta}{2} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right) dt = \\ &= \left[a - b\omega_{cp} \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right) \right] \omega_{cp} T. \end{aligned} \quad (5)$$

Соответственно, действующая мощность

$$P_{cp} = P(t)_{cp} = \frac{L}{T} = \left[a - b\omega_{cp} \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right) \right] \omega_{cp}$$

и действующий момент

$$M_{cp} = M(\varphi)_{cp} = \frac{L}{\Theta} = a - b\omega_{cp} \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right). \quad (7)$$

Намагничивающая сила параллельных обмоток стартерных электродвигателей смешанного возбуждения составляет 20—40% от суммарной намагничивающей силы в режиме номинальной мощности, поэтому результирующий магнитный поток меньше зависит от тока якоря и механические характеристики ближе к линейным, чем у электродвигателей с последовательным возбуждением.

Зависимости действующих значений мощности и вращающего момента электродвигателя с линейной механической характеристикой от частоты

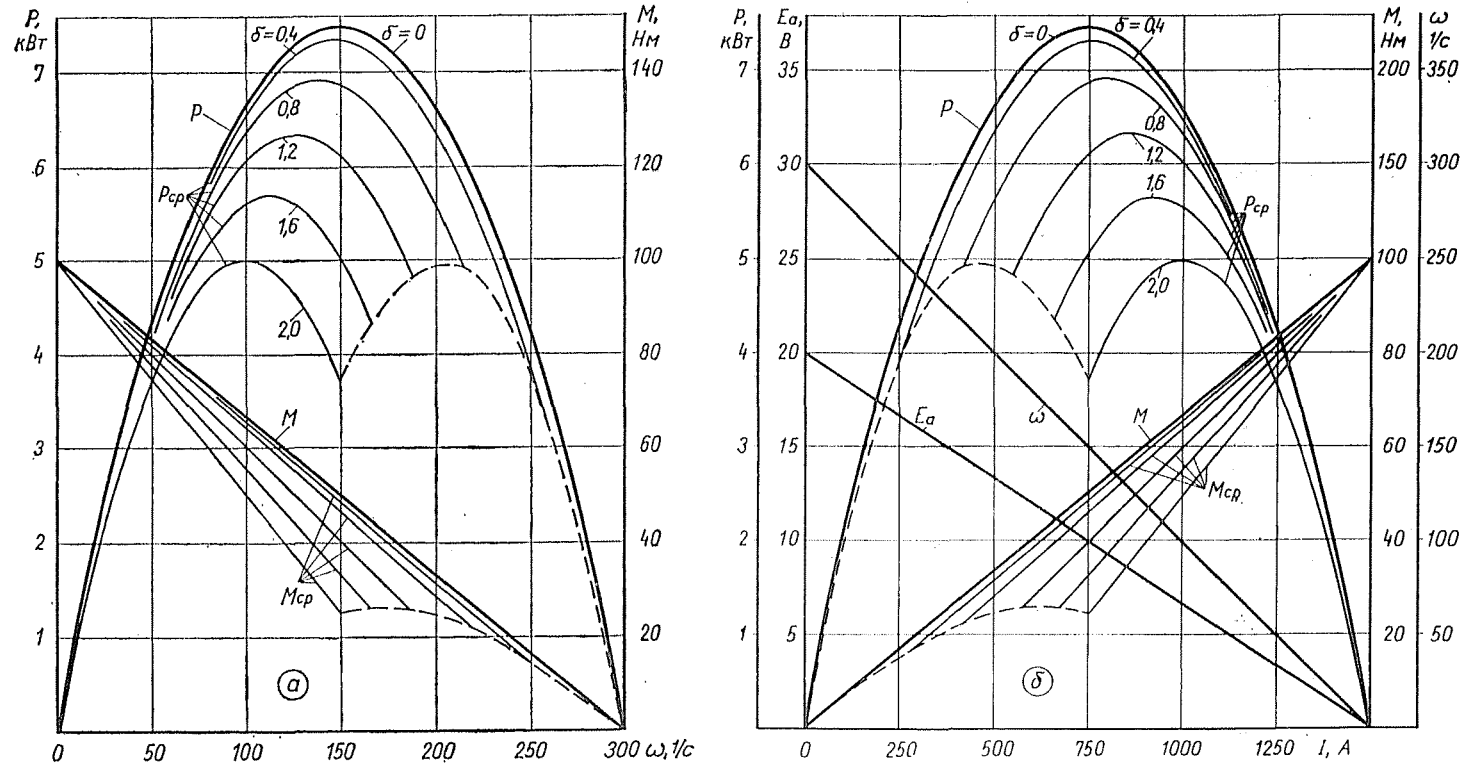


Рис. 2. Влияние неравномерности вращения якоря на мощность и момент электродвигателя с линейной механической характеристикой

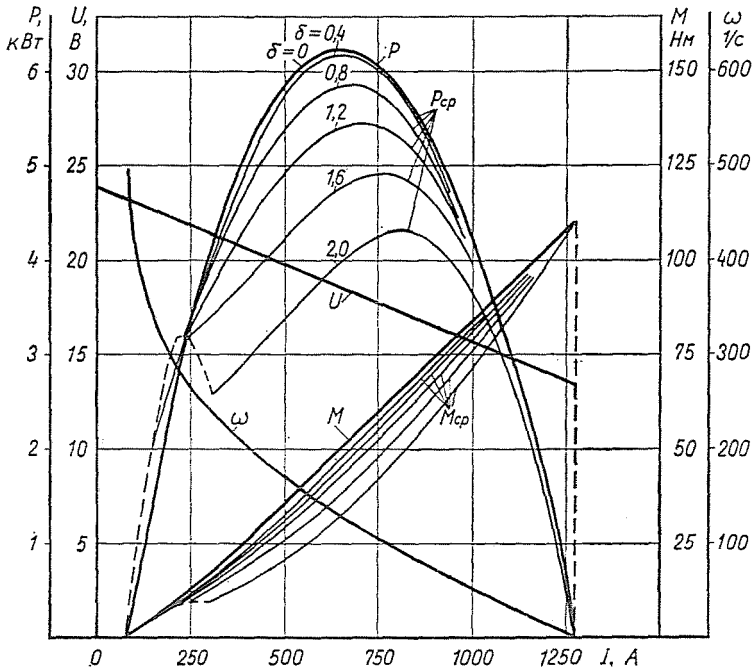


Рис. 3. Электромеханические характеристики стартерного электродвигателя последовательного возбуждения при различной неравномерности вращения якоря

вращения и тока при различных коэффициентах δ приведены на рис 2. Пунктирными линиями на графиках ограничены зоны, в которых якорь электродвигателя вращается без остановки и функции $\omega(t)$ сохраняют синусоидальный характер. С увеличением δ действующие значения мощности и момента заметно снижаются, причём степень снижения при той же неравномерности вращения существенно зависит от режима работы электродвигателя по частоте вращения или по току.

Стартерные электродвигатели в реальных условиях пуска холодных двигателей при низких температурах, на которые рассчитывается пусковая система, работают обычно в области насыщения магнитной системы, где механические характеристики линейны. Поэтому выводы, сделанные для электродвигателей с линейными механическими характеристиками, справедливы и для стартеров последовательного возбуждения в рабочем диапазоне (рис. 3). Для реальных стартеров последовательного возбуждения характерно даже некоторое увеличение действующей мощности в режимах, близких к холостому ходу. Но эти режимы не представляют интереса с точки зрения обеспечения пуска поршневого двигателя при низких температурах. Зависимости действующих значений мощности и вращающего момента от тока при различных коэффициентах δ , приведённые на рис. 3, построены по данным

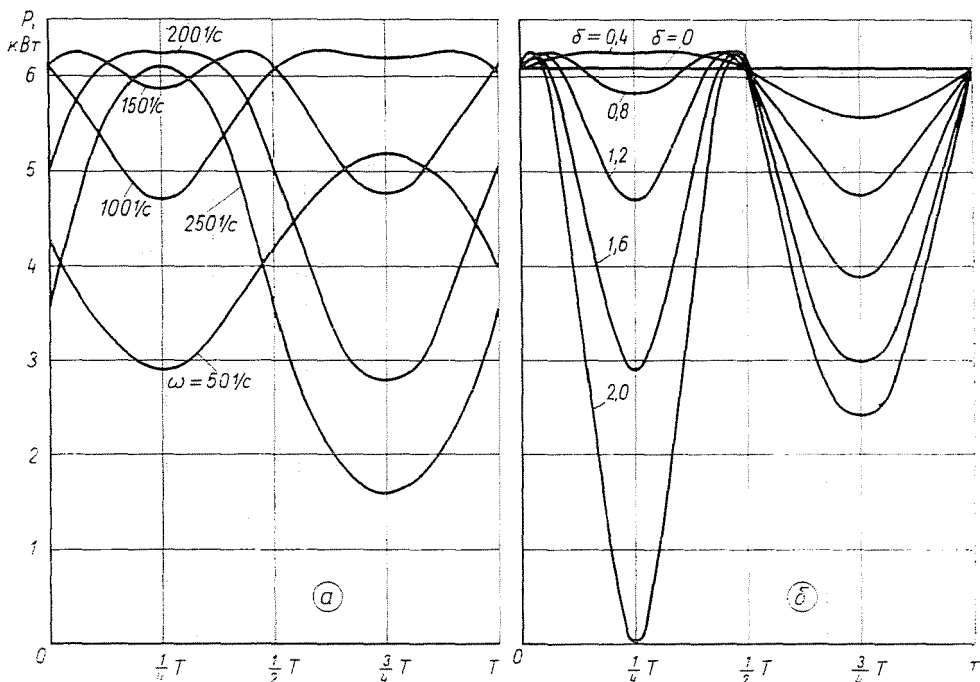


Рис. 4. Изменение мощности стартерного электродвигателя по времени при различных средних частотах и коэффициентах неравномерности вращения: а) $\delta \equiv 0,8$; б) $\omega_{cp} = 150$ 1/с.

планиметрирования кривых $P(t)$ (рис. 4), которые дают наглядное представление об изменении мгновенной мощности по времени при неравномерном вращении якоря.

Влияние неравномерности вращения на выходные характеристики стартерных электродвигателей весьма существенно и его необходимо учитывать при определении расчётных параметров стартеров в анализе работоспособности электропусковой системы на двигателе.

Мощность электродвигателя с линейной механической характеристикой вида (4) при равномерном вращении с заданной средней частотой ω_{cp} :

$$P = (a - b\omega_{cp})\omega_{cp}. \quad (8)$$

Исследуя функцию (8) на максимум, получим:

$$b = \frac{a}{2\omega_{P \max}}, \quad (9)$$

где $\omega_{P \max}$ — частота вращения якоря в режиме максимальной мощности.

Подставления (9) в уравнение (8), находим:

$$P = a \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}} \right) \omega_{cp}. \quad (10)$$

Среднему моменту сопротивления движению электропривода $M_{c, cp}$ при неравномерном вращении должен быть равен действующий вращающий момент электродвигателя. Тогда, с учётом (9):

$$M_{c, cp} = M_{cp} = a - b\omega_{cp} \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right) = a \left[1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}} \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right) \right]. \quad (11)$$

Следовательно, при неравномерном вращении:

$$a = \frac{M_{c, cp}}{1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}} \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right)} \quad (12)$$

После подстановки (12) в уравнение (10) имеем:

$$P = \frac{1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}}}{1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}} \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right)} M_{c, cp} \cdot \omega_{cp}. \quad (13)$$

Режим работы стартерных электродвигателей при пуске поршневых двигателей внутреннего сгорания обычно задаётся величиной кратности рабочего тока I току короткого замыкания I_k . В этом случае электромагнитная мощность электродвигателя с последовательным возбуждением

$$P = E_a \cdot I = (U_H - \Delta U_{щ}) (1 - k) I_k, \quad (14)$$

где E_a — электродвижущая сила, индуцируемая в обмотке якоря; U_H — номинальное напряжение; $\Delta U_{щ}$ — падение напряжения в контактной паре щётки-коллектор; k — кратность рабочего тока.

Максимальная электромагнитная мощность

$$P_{\max} = E_{aP \max} \cdot I_{P \max} = \frac{(U_H - \Delta U_{щ}) I_k}{4} \quad (15)$$

и отношение

$$\frac{P}{P_{\max}} = 4k(1 - k). \quad (16)$$

С другой стороны, согласно уравнению (10),

$$P_{\max} = \frac{1}{2} a \cdot \omega_{P \max} \quad (17)$$

и, следовательно, отношение

$$\frac{P}{P_{\max}} = \frac{a \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}} \right) \omega_{cp}}{\frac{1}{2} a \omega_{P \max}} = 2 \frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}} - \left(\frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}} \right)^2. \quad (18)$$

Приравнявая (16) и (18), получим квадратное уравнение:

$$\left(\frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}} \right)^2 - 2 \frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}} + 4\kappa(1-\kappa) = 0, \quad (19)$$

один из корней которого даёт значение $\frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}}$, выраженное через кратность рабочего тока:

$$\frac{\omega_{vp}}{\omega_{P \max}} = 2(1-\kappa). \quad (20)$$

Подставляя (20) в уравнение (13), находим:

$$P = \frac{\kappa}{1 - (1-\kappa) \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right)} M_{c.c.p.} \cdot \omega_{cp}, \quad (21)$$

и, соответственно,

$$M = \frac{P}{\omega_{cp}} = \frac{\kappa}{1 - (1-\kappa) \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right)} M_{c.c.p.} \quad (22)$$

Формулы (13), (21) и (22) дают значения мощности и вращающего момента (именуемые в дальнейшем полными), которые электродвигатель должен развивать в выбранном режиме по $\frac{\omega_{cp}}{\omega_{P \max}}$ или по кратности рабочего тока

$\kappa = \frac{I}{I_k}$ при равномерном вращении, чтобы при известной степени неравномерности совершить необходимую работу по прокручиванию коленчатого вала поршневого двигателя с заданной средней частотой.

Независимо от выбранной кратности рабочего тока, при проектировании стартерных электродвигателей в качестве расчётных целесообразно принимать параметры, соответствующие максимальной полной мощности:

$$P_{\max} = \frac{P}{4\kappa(1-\kappa)} = \frac{M_{c.c.p.} \cdot \omega_{cp}}{4 \left[(1-\kappa) - (1-\kappa)^2 \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right) \right]}; \quad (23)$$

$$\omega_{P \max} = \frac{\omega_{cp}}{2(1-\kappa)}; \quad (24)$$

$$M_{P \max} = \frac{P_{\max}}{\omega_{P \max}} = \frac{M_{c \text{ ср.}}}{2 \left[1 - (1 - \kappa) \left(1 + \frac{\delta^2}{\delta} \right) \right]} \quad (25)$$

Емкость аккумуляторной батареи при заданной кратности разрядного тока зависит от потребляемого стартерным электродвигателем тока в рабочем режиме, величина которого

$$\begin{aligned} I &= \kappa \cdot I_{\kappa} = 2 \kappa \cdot I_{P \max} = \frac{4 \kappa \cdot P_{\max}}{U_H - \Delta U_{\text{щ}}} = \\ &= \frac{M_{c \text{ ср.}} \cdot \omega_{c \text{ ср.}} \cdot \kappa}{(U_H - \Delta U_{\text{щ}}) \left[(1 - \kappa) - (1 - \kappa)^2 \left(1 + \frac{\delta^2}{\delta} \right) \right]}, \end{aligned} \quad (26)$$

где $I_{P \max} = \frac{I_{\kappa}}{2}$ — ток в режиме максимальной мощности.

Кратность рабочего тока при расчёте пусковой системы выбирается обычно в зависимости от требуемой быстроходности электродвигателя. Средняя частота вращения якоря в рабочем режиме

$$\omega_{c \text{ ср.}} = \omega_{\min} \cdot i, \quad (27)$$

где i — передаточное число от стартера к двигателю; ω_{\min} — минимальная пусковая частота вращения коленчатого вала, при которой пуск поршневого двигателя обеспечивается в пределах заданного периода времени.

Увеличивая кратность рабочего тока, при малых значениях i и ω_{\min} можно повысить быстроходность стартерного электродвигателя. Современные автомобильные и тракторные двигатели при ограниченном конструктивными условиями передаточном числе имеют сравнительно низкие минимальные пусковые частоты вращения, поэтому режим работы стартера при пуске двигателя для повышения его быстроходности рекомендуется выбирать при кратности тока $\kappa = \frac{2}{3}$ [2].

Расчётные формулы, полученные для кратности рабочего тока $\kappa = \frac{1}{2}$ и $\kappa = \frac{2}{3}$, сведены в таблицу.

При кратности рабочего тока $\kappa = \frac{1}{2}$ расчётный режим, соответствующий максимальной полной мощности, как по частоте вращения, так и по току, совпадает с рабочим (рис. 5). Расчётная мощность и вращающий момент с увеличением неравномерности вращения быстро возрастают, тогда как расчётная частота остаётся неизменной и равной заданной средней частоте вращения якоря $\omega_{c \text{ ср.}}$. Пропорционально увеличению мощности возрастает и рабочий ток

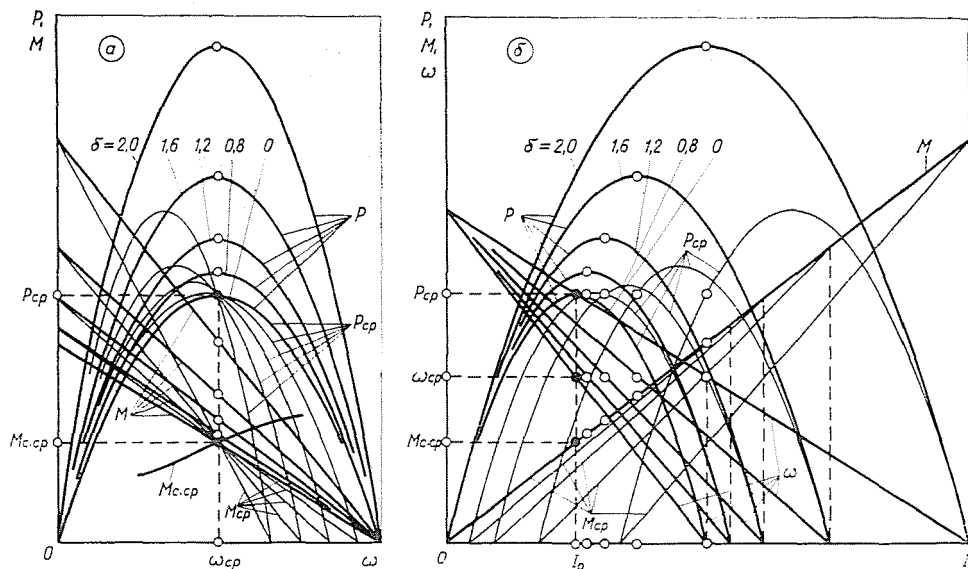


Рис. 5. Расчётные электромеханические характеристики электродвигателя, обеспечивающие вращение якоря с заданной средней частотой при различных коэффициентах неравномерности и кратности рабочего тока $\kappa = 1/2$

Вариант расчёта	I	II	III
$K = \frac{I}{I_K}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{4 + \delta^2}{8 + \delta^2}$
$\omega_{P \max}$	$\omega_{ср}$	$1,5 \omega_{ср}$	$\omega_{ср} \left(1 + \frac{\delta^2}{8}\right)$
$M_{P \max}$	$\frac{M_{с.ср.}}{1 - \frac{\delta^2}{8}}$	$\frac{1,5 M_{с.ср.}}{2 - \frac{\delta^2}{8}}$	$M_{с.ср.}$
P_{\max}	$\frac{M_{с.ср.} \cdot \omega_{ср}}{1 - \frac{\delta^2}{8}}$	$\frac{2,25 M_{с.ср.} \cdot \omega_{ср}}{2 - \frac{\delta^2}{8}}$	$M_{с.ср.} \cdot \omega_{ср} \left(1 + \frac{\delta^2}{8}\right)$
I	$\frac{2 M_{с.ср.} \cdot \omega_{ср}}{(U_H - \Delta U_{щ}) \left(1 - \frac{\delta^2}{8}\right)}$	$\frac{6 M_{с.ср.} \cdot \omega_{ср}}{(U_H - \Delta U_{щ}) \left(2 - \frac{\delta^2}{8}\right)}$	$\frac{2 M_{с.ср.} \cdot \omega_{ср} \left(1 + \frac{\delta^2}{4}\right)}{U_H - \Delta U_{щ}}$

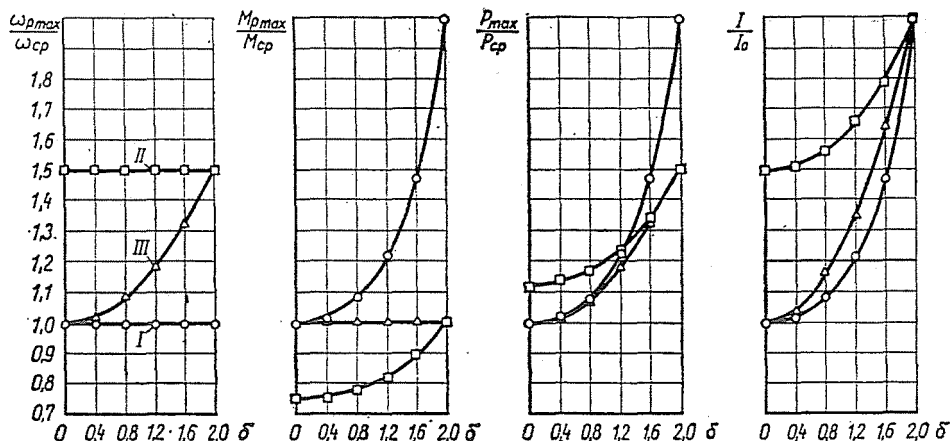


Рис. 6. Изменение расчётных параметров электродвигателя в зависимости от коэффициента неравномерности вращения для различных вариантов расчёта

относительно тока I_0 , который стартерный электродвигатель, работая в режиме максимальной мощности, будет потреблять при равномерном вращении:

$$I_0 = \frac{2 M_{с.ср.} \cdot \omega_{ср}}{U_H - \Delta U_{щ}} \quad (28)$$

Увеличение расчётной мощности, вращающего момента и рабочего тока с увеличением δ при неизменной расчётной частоте вращения якоря неизбежно ведёт к увеличению массы, габаритных размеров и стоимости пусковой системы.

Влияние неравномерности вращения якоря на требуемые расчётные параметры электродвигателя при кратности рабочего тока $k = \frac{2}{3}$ аналогично, но благодаря смещению рабочего режима в область меньших частот по отношению к режиму максимальной мощности, где неравномерность меньше сказывается на выходных характеристиках, расчётная мощность растёт медленнее (рис. 6).

Зависимость расчётных параметров электродвигателя от кратности рабочего тока указывает на возможность выбора такого режима работы для каждого значения δ , при котором расчётная мощность будет минимальной. Анализируя (23) на минимум, получим:

$$k_{III} = \frac{4 + \delta^2}{8 + \delta^2} \quad (29)$$

Формулы для третьего расчётного варианта, полученные после подстановки (29) в уравнения (23)–(26), также приведены в таблице. В отличие от двух первых, в третьем варианте расчётная мощность повышается за счёт

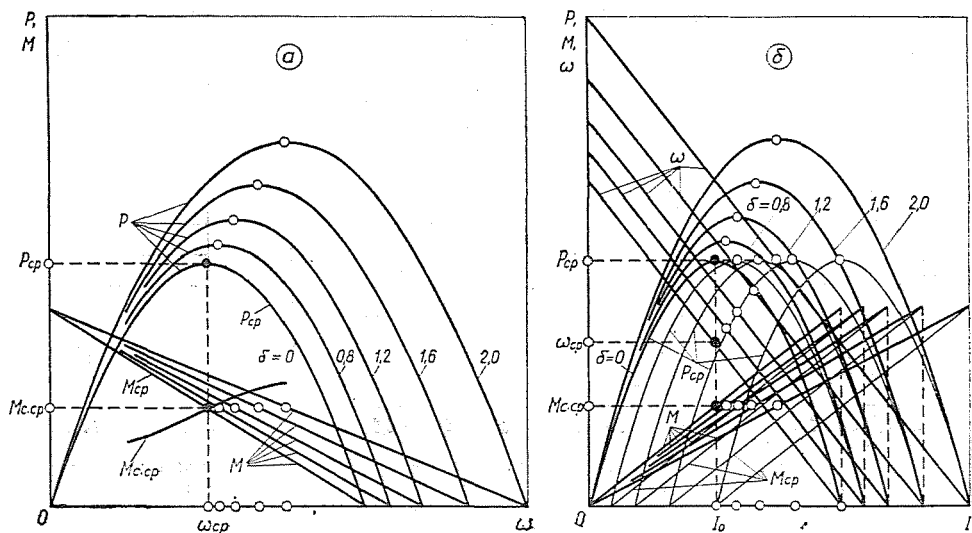


Рис. 7. Электромеханические характеристики электродвигателя, обеспечивающие вращение якоря с заданной средней частотой при минимуме расчётной мощности

увеличения частоты вращения якоря при сохранении постоянства расчётного вращающего момента, равного заданному среднему приведённому моменту сопротивления движению электропривода (рис. 6 и 7). Кратность рабочего тока при этом изменяется от $\kappa = \frac{1}{2}$ при $\delta = 0$ до $\kappa = \frac{2}{3}$ при $\delta = 2,0$.

Ток в рабочем режиме несколько больше, чем в первом расчётном варианте, но при малых значениях δ значительно меньше, чем во втором. Особенностью данного варианта является то, что при всех значениях δ функция $P_{cp}(\omega)$ отстаёт неизменной и рабочий режим как на функции $P_{cp}(\omega)$, так и на функциях $P_{cp}(I)$, соответствует максимальной мощности (рис. 7). Рост мощности при одновременном повышении быстроходности электродвигателя благоприятно сказывается на его весовых и габаритных показателях.

Выбирая при заданных пусковых качествах поршневого двигателя и передаточном отношении наивыгоднейший вариант расчёта по кратности рабочего тока, можно улучшить экономические показатели электропусковой системы.

Основные выводы

1. При проектировании электропусковых систем и оценке их работоспособности на поршневых двигателях необходимо учитывать влияние неравномерности вращения якоря на требуемую расчётную мощность стартерного электродвигателя.

2. Расчётные значения мощности, вращающего момента и частоты вращения якоря при заданной степени неравномерности и, как следствие экономические показатели электропусковой системы, существенно зависят от выбранной кратности рабочего тока.

Литература

1. Чижков Ю. П.: Расчёт неравномерности вращения коленчатого вала двигателя при электростартерном пуске. «Известия вузов. Машиностроение», 1969, № 9.
2. Галкин Ю. М.: Электрооборудование автомобилей и тракторов. «Машиностроение», М., 1967.

Резюме

Аналитически доказана необходимость учёта неравномерного вращения якоря стартерного электродвигателя, характерного для режима пуска поршневого двигателя, при проектировании электропусковой системы. Предложена методика определения расчётной мощности стартера, который при известной степени неравномерности и выбранной кратности рабочего тока обеспечит вращение коленчатого вала двигателя с заданной средней частотой.

Чижков Юрий Павлович
(Кандидат технических наук, доцент кафедры)
«Автотракторное электрооборудование»
Московский автомеханический институт.