

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621. 06: 62-83

В.Ф. Егоров

СТРУКТУРЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРЕХПЕРИОДНЫХ ГРАФИКАХ ДВИЖЕНИЯ

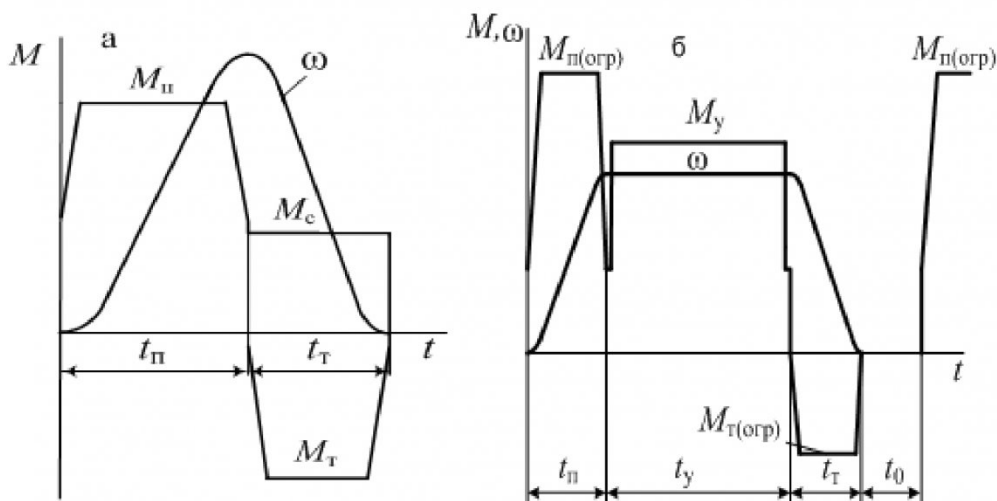
Работа большинства механизмов промышленных предприятий (прокатных станов, ножниц заготовочных станов, рабочих рольгангов, грузоподъемных машин, кузнечно-прессового оборудования и многих других механизмов) в соответствии с требованиями технологического процесса осуществляется в режимах пуска, реверса и торможения, т.е. когда значительная часть времени занята переходными процессами. Часто их характер предопределяет быстродействие системы. Для снижения времени переходных процессов пуск и торможение двигателя осуществляют при максимальном значении момента с учетом допустимой перегрузочной способности. Однако не всегда сокращение переходных процессов способствует повышению быстродействия. Для каждого конкретного режима работы существуют оптимальные условия пуска и торможения. Даже небольшое снижение времени относительно оптимального сопровождается значительным увеличением энергетических потерь двигателя и необходимостью либо повышения его мощности [1], либо длительности других участков для сохранения теплового баланса. При этом время цикла может не только не снизиться, но даже возрасти.

Улучшение силовой части привода, средств и методов управления привело к созданию электродвигателей, допускающих многократную перегрузку, что дало возможность существенно увеличить их динамические моменты. Вместе с тем практика

выбора переходных режимов осталась прежней. Анализ механизмов, оснащенных новым электроприводом показал, что во всех случаях динамические моменты выбраны завышенными. В связи с этим резко возросли расчетные нагрузки приводов. При двукратном снижении времени переходных процессов необходимая мощность двигателей увеличилась более чем в три раза [2].

Задачей исследований является изучение переходных процессов в новых условиях эксплуатации двигателей, установление рациональных режимов их пуска и торможения при снятии ограничений на пусковой и тормозной моменты двигателя.

В исследованиях авторов [2] отмечается, что максимальная производительность механизмов циклического действия достигается при условии работы двигателя только в переходных режимах. Разгон и торможение в данном случае осуществляется при полной статической нагрузке системы (рисунок а), что приводит к значительной нагрузке двигателя и увеличению его мощности. Для уточнения этого положения с целью сравнения энергетических показателей электроприводов при двухпериодных (рисунок а) и трехпериодных (рисунок б) режимах движения полагаем, что двигатели работают с одной и той же продолжительностью включения $\xi_{mp} = \xi_{os} = \xi$ (ξ_{mp}, ξ_{os} – относительные продолжительности включения, соответствующие трехпериодному «тр» и двухпериодному



Двухпериодный (а) и трехпериодный (б) графики скорости
и нагрузочные диаграммы двигателя

«дв» режимам движения); при равенстве пускового и тормозного моментов (асимметричный скоростной режим «асим») максимальная кратность пускового момента двигателя эквивалентна относительной продолжительности включения [3] $\psi_{\text{дв(асим)}} = \sqrt{1/\xi}$; время цикла $t_{\text{ц.пр}} = t_{\text{ц.дв}}/\delta_t$ (δ_t - коэффициент соответствия).

С учетом принятой диаграммы моментов (рис. 1,б) и заданного угла перемещения φ продолжительность машинного времени цикла составит

$$\xi t_{\text{ц.пр}} = t_{\text{у.пр}} + t_{\text{н.пр}} + t_{\text{т.пр}} = (\varphi - \varphi_{\text{н}} - \varphi_{\text{т}}) / \omega_{\text{н.пр}} + (t_{\text{н.пр}} + t_{\text{т.пр}}). \quad (1)$$

Здесь $t_{\text{у.пр}}$, $t_{\text{н.пр}}$, $t_{\text{т.пр}}$ - соответственно время установившегося движения, пуска и торможения трехпериодного графика скорости (mp);

$\varphi_{\text{н}}$, $\varphi_{\text{т}}$ - углы перемещения за время пуска и торможения

$\omega_{\text{н.пр}}$ - номинальная угловая скорость двигателя.

Так как

$\varphi_{\text{н}}/\omega_{\text{н.пр}} = t_{\text{н.пр}}/2$; $\varphi_{\text{т.пр}}/\omega_{\text{н.пр}} = t_{\text{т.пр}}/2$, пренебрегая значениями $\psi_{\text{н.пр}}/k$ и $\psi_{\text{т.пр}}/k$ ввиду их малости, будем иметь

$$\xi t_{\text{ц.пр}} = \frac{\xi t_{\text{ц.дв}}}{\delta_t} = \frac{\varphi}{\omega_{\text{н.пр}}} + \frac{j \omega_{\text{н.пр}}}{2 \psi_{\text{пр.пр}}}, \quad (2)$$

откуда находим значение номинальной угловой скорости трехпериодного графика

$$\omega_{\text{н.пр}} = (1 - \sqrt{1 - \delta_t^2 / \psi}) \sqrt{2 \varphi \psi_{\text{пр.дв}} / j \cdot \psi / \delta_t} \quad (3)$$

где j - отношение приведенного момента инерции к номинальному моменту двигателя;

$\psi_{\text{пр.пр}}$ - приведенное значение кратности динамического момента двигателя за время его пуска и торможения;

$$\psi = \psi_{\text{пр.пр}} / \psi_{\text{пр.дв}}.$$

При асимметричных графиках скорости (равенстве значений пускового и тормозного моментов двигателя)

$$\psi_{\text{пр.дв(асим)}} = \frac{\psi_{\text{н.дв(асим)}}^2 - \psi_c^2}{2 \psi_{\text{н.дв(асим)}}};$$

$$\psi_{\text{пр.тр(асим)}} = \frac{\psi_{\text{н.тр(асим)}}^2 - \psi_c^2}{2 \psi_{\text{н.тр(асим)}}};$$

при симметричных графиках скорости (равенстве угловых ускорений)

$$\psi_{\text{пр.дв(сим)}} = (\psi_{\text{н.дв(сим)}} - \psi_c) / 2;$$

$$\psi_{\text{пр.тр(сим)}} = (\psi_{\text{н.тр(сим)}} - \psi_c) / 2.$$

Из формулы среднеквадратичной нагрузки, полагая, что номинальный момент двигателя равен среднеквадратичному, двигатель принудительно обдуваем, и пренебрегая значениями

$\psi_{\text{н.пр}}/k$ и $\psi_{\text{т.пр}}/k$ ввиду их малости, имеем следующее.

При асимметричных графиках скорости

$$t_{\text{ц.дв(асим)}} = \psi_{\text{н.дв(асим)}}^2 (t_{\text{н.дв}} + t_{\text{т.дв}}); \quad (4)$$

$$t_{\text{ц.тр(асим)}} = (\psi_{\text{н.тр(асим)}}^2 - \psi_c^2 / 2) \times \frac{j \omega_{\text{н.пр}}}{\psi_{\text{н.тр(асим)}}} + \psi_c^2 \varphi / \omega_{\text{н.тр}}. \quad (5)$$

При симметричных графиках скорости

$$t_{\text{ц.дв(сим)}} = [(\psi_{\text{н.дв(сим)}} - \psi_c)^2 + \psi_c^2] \cdot 2 t_{\text{н.дв(сим)}}; \quad (6)$$

$$t_{\text{ц.тр(сим)}} = (\psi_{\text{н.тр(сим)}} - \psi_c)^2 + \psi_c^2 / 2 \times \frac{2 j \omega_{\text{н.пр}}}{\psi_{\text{н.тр(сим)}} - \psi_c} + \psi_c^2 \varphi / \omega_{\text{н.тр}}. \quad (7)$$

Согласуя условия теплового баланса двигателя с учетом зависимостей (2) и (3), находим при асимметричном режиме работы

$$\delta_t^2 (\text{асим}) = \frac{\psi_{\text{н.дв(асим)}}}{\psi_{\text{н.тр(асим)}}} \left\{ 2 - \frac{\psi_{\text{н.дв(асим)}}^2 - \psi_c^2}{\psi_{\text{н.тр(асим)}}^2 - \psi_c^2} \right\}; \quad (8)$$

при симметричном режиме работы

$$\delta_t^2 (\text{сим}) = \frac{\psi_{\text{т.дв(сим)}} - \psi_c}{\psi_{\text{н.тр(сим)}} - \psi_c} \left\{ 2 - \frac{(\psi_{\text{н.дв(сим)}} - \psi_c)^2}{(\psi_{\text{н.тр(сим)}} - \psi_c)^2} \right\} \quad (9)$$

Наибольшее быстродействие привода в асимметричных режимах достигается при кратности пускового момента

$$\hat{\psi}_{\text{н.тр(асим)}} = \sqrt{\frac{3}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{16 \psi_c^2}{9 (\psi_{\text{н.дв(асим)}}^2 - \psi_c^2)}} \right) \times (\psi_{\text{н.дв(асим)}}^2 - \psi_c^2) + \psi_c^2} \quad (10)$$

Как видно из представленной зависимости, на величину пускового момента двигателя влияет статическая нагрузка. Максимальное использование двигателя обеспечивается при величине нагрузки

$$\psi_c = \sqrt{\frac{\sqrt{29}-1}{14}} \psi_{\text{н.дв(асим)}} \approx 0.56 \psi_{\text{н.дв(асим)}}. \quad (11)$$

Ввиду незначительного влияния статической нагрузки без заметной погрешности в общем случае можно принимать

$$\psi_{\text{н.тр(асим)}}^{\text{max}} \approx 1.23 \psi_{\text{н.дв(асим)}} \approx 1.23 \sqrt{1/\xi} \quad (12)$$

При симметричных режимах движения оптимальная кратность пускового момента

$$\hat{\psi}_{\text{н.тр(сим)}} = \sqrt{1.5(1/\xi - \psi_c^2) + \psi_c} \quad (13)$$

Наибольшее значение кратности имеет место при величине статической нагрузки

$$\hat{\psi}_c = \sqrt{1/(2.5 \xi)} \text{ и соответственно равно}$$

$$\psi_{\text{н.тр(сим)}}^{\text{max}} = \sqrt{2.5/\xi} \approx 1.58 \sqrt{1/\xi}, \quad (14)$$

или

$$\psi_{\text{н.тр(сим)}}^{\text{max}} \approx 1.28 \psi_{\text{н.тр(асим)}}^{\text{max}}. \quad (15)$$

Оптимальные значения кратностей пусковых моментов двигателя при максимально допустимой статической нагрузке представлены в таблице.

Из приведенных выражений следует, что с изменением относительной продолжительности включения максимально допустимая перегрузочная способность двигателя в пусковых и тормозных режимах с целью повышения равномерности нагрузок должна изменяться в соответствии с относительной продолжительностью включения.

С переходом на новую продолжительность включения, моменты двигателя в переходных процессах должны приниматься

$$M_{расч} = M \sqrt{\xi / \xi_{расч}},$$

где $M_{расч}$ – оптимальный момент переходных процессов при расчетном значении относительной продолжительности включения $\xi_{расч}$;

M – допустимый момент переходных процессов при исходном значении ξ .

Пример. Выполним расчет мощности двигателя для следующих условий работы

$$M_c = 13,8 \text{ кНм}; \varphi = 52 \text{ рад}; J = 251 \text{ кгм}^2;$$

$$\psi_{max} \leq 2,5; t_u \leq 5 \text{ с}; \xi = 0,4.$$

Решение:

Вариант I. Скоростной режим работы асимметричный ($M_{II} = M_T$).

Кратность пускового и тормозного моментов двигателя при оптимальных условиях загрузки

$$\hat{\psi}_{II \text{ дв} (асим)} = 1/\sqrt{\xi} = 1/\sqrt{0,4} = 1,58$$

Номинальный момент двигателя с учетом нагрева и отработки заданного угла

$$M_{н \text{ дв} (асим)} = \frac{1}{\psi_{н \text{ дв} (асим)}} \left\{ M_c^2 + \left(\frac{2J \varphi}{\xi^2 t_u^2 \text{ дв}} \right)^2 + \frac{2J \varphi}{\xi^2 t_u^2 \text{ дв}} \right\} =$$

$$= \frac{1}{1,58} \left\{ 13800^2 + \left(\frac{2 \cdot 251 \cdot 52}{0,4^2 \cdot 5^2} \right)^2 + \frac{2 \cdot 251 \cdot 52}{0,4^2 \cdot 5^2} \right\} = 13,8 \text{ кНм}$$

Номинальная угловая скорость двигателя

$$\omega_{н \text{ дв} (асим)} = 2 \varphi / \xi t_u \text{ дв} = \frac{2 \cdot 52}{0,4 \cdot 5} = 52 \text{ рад / с}$$

Для трехпериодного графика скоростей соответственно находим следующие показатели

Кратность пускового момента двигателя

$$\hat{\psi}_{н \text{ тр} (асим)} = \sqrt{\frac{3}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{16}{9(1,58^2 - 1)}} \right) \times (1,58^2 - 1) + 1} = 1,95$$

Отношение длительностей циклов

$$\delta_{t (асим)} = \sqrt{\frac{1,58 \left(2 - \frac{1,58^2 - 1}{1,95^2 - 1} \right)}{1,95}} = 1,09$$

Цикл трехпериодного графика работы

$$t_{ч \text{ тр} (асим)} = \frac{t_{дв} (асим)}{\delta_t} = \frac{5}{1,09} = 4,59$$

Приведенная кратность пускового и тормоз-

ного моментов двигателя

$$\psi_{н \text{ тр} (асим)} = \frac{1,95^2 - 1}{2 \cdot 1,95} = 0,72;$$

$$\psi_{н \text{ дв} (асим)} = \frac{1,58^2 - 1}{2 \cdot 1,58} = 0,47;$$

$$\psi_{асим} = \frac{\psi_{н \text{ тр} (асим)}}{\psi_{н \text{ дв} (асим)}} = \frac{0,72}{0,47} = 1,53$$

Номинальная скорость движения

$$\omega_{н \text{ тр}} = \left(1 - \sqrt{1 - \delta_t^2 / \psi_{(асим)}} \right) \times$$

$$\sqrt{2 \varphi \psi_{н \text{ дв} (асим)} / j \cdot \psi_{(асим)} / \delta_t} =$$

$$= \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1,09^2}{1,53}} \right) \sqrt{2 \cdot 52 \cdot 0,47 \cdot 13800 / 251} \cdot$$

$$\times 1,53 / 1,09 = 38,72 \text{ рад / с}.$$

Таким образом, с переходом от асимметричного двухпериодного графика скорости к асимметричному трехпериодному графику быстродействие привода возрастет на 9 %, уровень использования двигателя по перегрузочной способности увеличится на 23 %, номинальная скорость снизится на 34 %.

Вариант II. Симметричный режим работы.

При двухпериодном графике

$$\hat{\psi}_{н \text{ дв} (сим)} = \sqrt{2 / \xi} = \sqrt{2 / 0,4} = 2,236.$$

$$\hat{\psi}_{н \text{ дв} (сим)} = \hat{\psi}_{н \text{ дв} (сим)} - 2\psi_c = 2,236 - 2 = 0,236.$$

Из условия равенства энергетических затрат

$$\omega = \sqrt{2 \hat{\psi}_{н \text{ дв} (сим)} \varphi_n / j} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 1,236 \cdot 26 / 0,0187} = 58,6 \text{ рад/с}.$$

$$t_{н \text{ дв} (сим)} = t_{м \text{ дв} (сим)} = 2 \varphi_n / \omega =$$

$$= 2 \cdot 26 / 58,6 = 0,887 \text{ с}.$$

$$t_{ч \text{ раб}} = t_{н \text{ дв} (сим)} + t_{м \text{ дв} (сим)} = 2 t_{н \text{ дв} (сим)}$$

$$= 2 \cdot 0,887 = 1,774 \text{ с}.$$

$$t_{ч \text{ дв} (сим)} =$$

$$\left((\hat{\psi}_{н \text{ дв} (сим)} - \psi_c)^2 + \psi_c^2 \right) 2 t_{н \text{ дв} (сим)} =$$

$$= ((2,236 - 1)^2 + 1) 2 \cdot 0,887 = 4,48 \text{ с}.$$

При трехпериодном графике

$$\hat{\psi}_{н \text{ тр} (сим)} = \sqrt{2,5 / \xi} = 2,5$$

$$\hat{\psi}_{н \text{ тр} (сим)} = \hat{\psi}_{н \text{ тр} (сим)} - 2\psi_c =$$

$$= 2,5 - 2 = 0,5.$$

$$\delta_{t (сим)} = \sqrt{\frac{\hat{\psi}_{н \text{ дв} (сим)} - \psi_c}{\hat{\psi}_{н \text{ тр} (сим)} - \psi_c} \times$$

$$\left(2 - \frac{(\hat{\psi}_{н \text{ дв} (сим)} - \psi_c)^2}{(\hat{\psi}_{н \text{ тр} (сим)} - \psi_c)^2} \right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{2,236 - 1}{2,5 - 1} \left(2 - \frac{(2,236 - 1)^2}{(2,5 - 1)^2} \right)} = 1,04.$$

$$t_{ц\text{ пр}(сим)} = t_{ц\text{ дв}(сим)} / \delta_{т(сим)} = 4.48 / 1.04 = 4.30 \text{ с.}$$

$$\psi_{(сим)} = \frac{\widehat{\psi}_{н\text{ пр}(сим)} - 1}{\widehat{\psi}_{н\text{ дв}(сим)} - 1} = \frac{1.5}{1.236} = 1.21$$

$$\omega_{н\text{ пр}} = \left(1 - \sqrt{1 - \delta_{т}^2 / \psi_{(сим)}}\right) \times \sqrt{2\varphi\psi_{н\text{ пр.дв}(сим)} / j \cdot \psi_{(сим)} / \delta_{т}} =$$

$$= \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1.04^2}{1.21}}\right) \sqrt{2 \cdot 52 \cdot 0.618 / 0.0187} \times 1.21 / 1.04 = 46 \text{ рад / с.}$$

$$t_{н(сим)} = t_{м(сим)} = j\omega\psi_{н\text{ пр}(сим)} - 1) = 0.0187 \cdot 46 / (2.5 - 1) = 0.573 \text{ с.}$$

$$t_{ц\text{ раб}} = 1.71 \text{ с}$$

Т.е. быстродействие привода при трехпериодном графике увеличится на 4 %, а по отношению к двухпериодному асимметричному графику - на 16 - 17 %, использование двигателя по перегрузочной способности возрастет в 1,58 раза, номинальная скорость снизится на 13%

Выводы

Если принимаемые значения пускового и тормозного моментов не достигают перегрузочной способности двигателя, максимальное быстродействие механизмов повторно кратковременного режима работы достигается при симметричном, трехпериодном режиме работы. Вместе с тем трехпериодные режимы по сравнению с двухпериодными имеют меньшую номинальную скорость и необходимую мощность двигателя.

Оптимальная кратность пусковых моментов двигателя при максимально допустимой статической нагрузке

Скоростной режим	Двух периодный асимметричный	Трехпериодный асимметричный	Двух периодный симметричный	Трехпериодный симметричный
Кратность пускового момента	$\sqrt{1/\xi}$	$\sqrt{1,5/\xi}$	$\sqrt{2/\xi}$	$\sqrt{2,5/\xi}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Н.Ф. Энергосбережение в электроприводе [Текст] / Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов – М: Высшая школа, 1989 – 126 с.
2. Иванченко Ф.К. Динамика и прочность прокатного оборудования [Текст] / Ф.К. Иванченко и др. - М: Металлургия, 1970. – 487 с.
3. Егоров В.Ф. Электромеханические системы циклического нагружения [Текст] / В.Ф. Егоров – Челябинск: Металлургия, 1991– 205 с.

□ Автор статьи:

Егоров
Владимир Федорович
- канд.техн.наук, доц. каф. механического оборудования металлургических заводов Сибирского госуд. индустриального унив-та, г. Новокузнецк.
Тел. 8(3843) 46-48-01
E-mail: evf@zaoproxy.ru

УДК 621.81

В.Ф. Егоров, С.В. Егоров

НАГРУЗКИ УПРУГО-МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В современных условиях эксплуатации оборудования важное значение приобретают вопросы повышения быстродействия, высокой работоспособности и надежности оборудования. Развитие систем автоматического управления с повышением скоростей движения механизмов приводит, как правило, к

возникновению и развитию нежелательных динамических процессов, создающих дополнительные нагрузки в трансмиссиях машин, снижающих прочность и долговечность деталей.

Вред, наносимый упруго-динамическими колебаниями элементов конструкций, может быть