

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.06:62-83

С.В. Егоров, В.Ф. Егоров

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК В МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Взаимосвязанный электропривод в установках большой мощности позволяет уменьшить нагрузку каждого двигателя и тем самым облегчить передачу энергии к рабочему органу. Однако при недостаточной увязке применяемых двигателей общие затраты мощности могут оказаться значительно выше, чем при установке однодвигательного привода [1]. Современная теория и практика не имеют достаточных сведений об эффективности взаимодействия двигателей при переменных режимах их нагружения. С целью обеспечения надежной эксплуатации привода запасы мощности рекомендуется принимать трехкратными [2], что приводит к необходимости повышения запаса прочности элементов конструкции и, как следствие, увеличению параметров оборудования, потерь энергии, эксплуатационных затрат и пр. Для оценки мощности отдельных двигателей предварительно производят расчет общей мощности по условию эксплуатации однодвигательного привода. Однако при недостаточной согласованности взаимодействия нагрузки отдельных двигателей могут превысить допустимые значения и вызвать преждевременный выход этих двигателей из строя.

При переменных значениях момента M (тока двигателя I) каждый двигатель должен выбираться в соответствии с его эквивалентной нагрузкой. Таким образом, общая расчетная мощность привода составит

$$P_{об} = \sum_{k=1}^n \omega_n \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_{ki}^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}} \quad (1)$$

где ω_n – номинальная скорость двигателя; t – время; 1, 2, ..., n – индексы соответствующие нумерации двигателей; $i = 1, \dots, m$ – индексы нумерации нагрузок.

Так как при совместной работе двигателей в установившихся режимах минимально затрачиваемая мощность эквивалентна мощности однодвигательного привода, приравнявая мощности многодвигательного (1) и однодвигательного (2)

приводов

$$P_{одн} = \omega_n \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}}, \quad (2)$$

находим

$$\sum_{k=1}^n \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_{ki}^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}}. \quad (3)$$

Данное условие может быть выполнено лишь в том случае, когда режимы нагружения каждого из двигателей будут соответствовать общему характеру изменения нагрузок. При этом двигатели могут иметь различные мощности.

Если нагрузки одиночных двигателей пропорциональны нагрузкам однодвигательного привода, то равенство (3) может быть представлено в виде

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}}, \quad (4)$$

где α_j – коэффициент кратности нагрузок j -го двигателя

При работе двигателей на общий механический вал синхронность скоростей обеспечивается за счет механических связей.

Следовательно, мощности одиночных двигателей должны быть кратны мощности однодвигательного привода. Согласно данному условию и равенству (4) общая сумма коэффициентов α_j равна 1.

В случае установки двигателей $P_{од}$ одинаковой мощности $\alpha_j = \alpha = 1/n$ и, следовательно, $P_{од} \geq P_{одн}/n$.

Рассмотрим возможность сохранения пропорциональности распределения нагрузок между двигателями в условиях изменения момента сил сопротивления.

При линейных формах механических характеристик нагрузка между двигателями при работе на статической характеристике будет распределяться следующим образом

$$M_{ji} = \beta_j (\omega_{0j} - \omega_i) = M_{cji}, \quad (6)$$

где β_j , ω_{0j} – жесткость механической характеристики и соответственно скорость холостого хода

двигателя; ω_i – угловая скорость двигателя при действии i – ой нагрузки; M_{cji} – момент внешних сил.

Момент, развиваемый электроприводом

$$M_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n \beta_j (\omega_{0j} - \omega_i) = M_{ci} \quad (7)$$

Ввиду равенства угловых скоростей ω_i отдельных двигателей имеем.

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n \beta_j \omega_{0j} - M_{ci}}{\sum_{j=1}^n \beta_j} = \omega_{0\Sigma} - \frac{M_{ci}}{\beta_{\Sigma}} \quad (8)$$

где $\beta_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n \beta_j$; $\omega_{0\Sigma}$ – скорость холостого хода привода.

Решая совместно (7) и (8), находим

$$M_{\Sigma} = \beta_{\Sigma} (\omega_{0\Sigma} - \omega_i) \quad (9)$$

Из (6) и (9) следует, если согласованы скорости идеального холостого хода двигателей и привода $\omega_{01} = \omega_{02} = \dots = \omega_{0j} = \omega_{0\Sigma}$, распределение нагрузок не зависит от характера их изменения и пропорционально жесткостям механических характеристик

$$M_j / M_{\Sigma} = \beta_j / \beta_{\Sigma}$$

Таким образом, чтобы обеспечить распределение моментов между двигателями пропорционально номинальным мощностям, нужно привести их жесткости в соответствие с номинальными параметрами.

Согласование только жесткостей без выравнивания скоростей холостого хода не приводит к пропорциональному распределению нагрузок. В этом случае

$$\frac{M_j}{M_{\Sigma}} = \frac{P_{Hj} (\omega_{0j} - \omega_i)}{P_{H\Sigma} (\omega_{0\Sigma} - \omega_i)}$$

С изменением угловой скорости привода ω_i изменяется пропорциональность распределения моментов.

Относительное изменение нагрузки на двигатель составит

$$\delta M = \left(\frac{(\omega_{0j} - \omega_i) \beta_j}{\alpha_j M_c} - 1 \right) \cdot 100 \%$$

где $\beta_j = \frac{c^2 \phi_j^2}{R_j}$;

$c\phi$ – произведение конструктивной постоянной (c) на магнитный поток (ϕ);

R – сопротивление якорной цепи.

В таблице приведены результаты выполненных расчетов согласно данной зависимости для двухдвигательного привода при возможных изменениях магнитного потока и момента сил сопротивления. Значение α_1 принято равным α_2 .

Из представленных данных видно, какой большой перепад нагрузок возможен даже при незначительных изменениях магнитного потока.

Таблица .Влияние магнитного потока на распределение моментов двигателей

$M_c / M_{c \text{ ном}}, \%$	100	95	90	85	80	
$\delta\phi, \%$	$\omega_{02} / \omega_{01}, \%$	$\delta M, \%$				
0	100	4	4	4	4	4
0,5	99,5	15,9	16,6	17,3	18,2	19,1
1,0	99,0	27,7	29,0	30,5	32,2	34,1
1,5	98,5	39,3	41,3	43,6	46,1	48,9

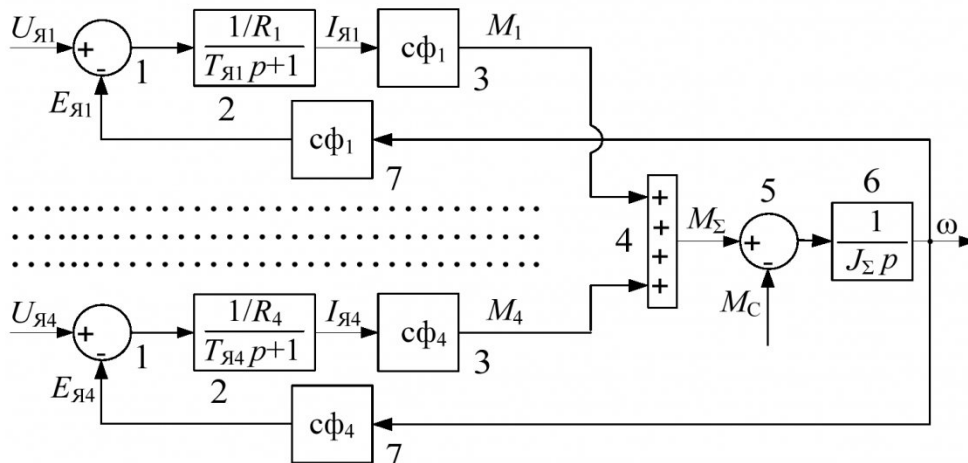


Рис. 1. Структурная схема четырехдвигательного электропривода

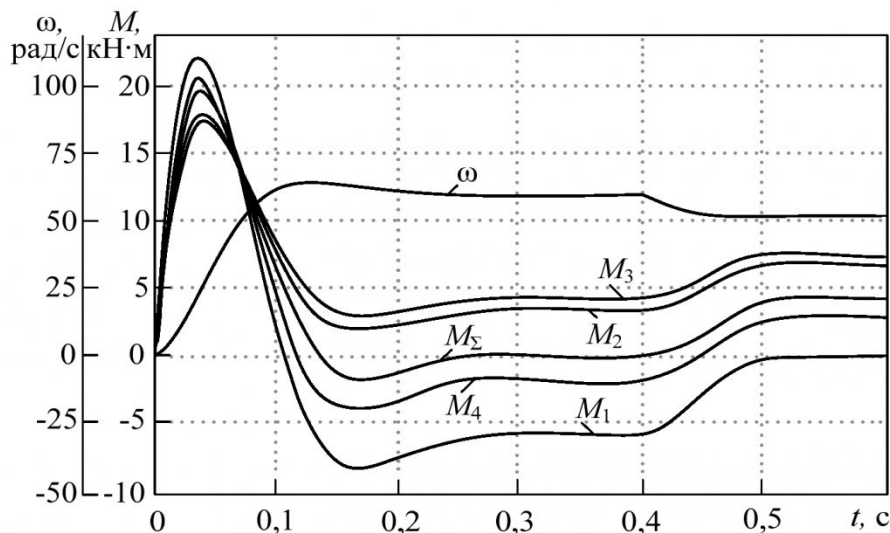


Рис. 2. Влияние отклонений скорости холостого хода и жесткости механической характеристики на распределение моментов между двигателями

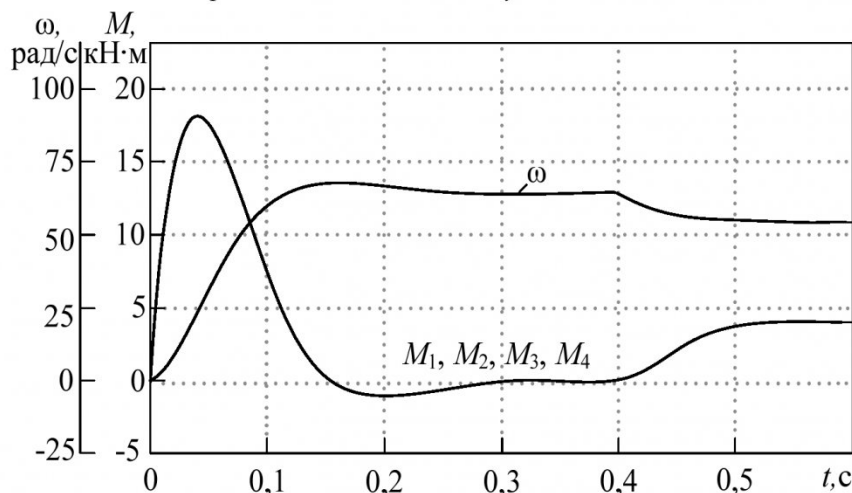


Рис. 3. Распределение моментов между двигателями при равных скоростях холостого хода и жесткостях механических характеристик

2,0	98,0	50,3	53,2	56,5	59,8	63,6
3,0	97,0	73,5	77,5	81,9	86,9	92,4
4,0	96,0	95,6	101	107	113	121

Выделенные результаты указывают на то, что, если двигатели одинаковой мощности, вся нагрузка будет восприниматься только одним двигателем. Второй из двигателей переходит в генераторный режим и создает дополнительную нагрузку (перегрузка двигателя превышает 100 %).

Причиной изменения магнитного потока может стать различие температур нагрева двигателей, оказывающих значительное влияние на магнитную проницаемость среды. Следует заметить, что даже при равномерном распределении нагрузок условия охлаждения двигателей могут отличаться вследствие неравенства воздушных зазоров, различия

вентиляции, коэффициентов полезного действия и т. п. Указанные причины особенно при жестких механических характеристиках могут приводить к наблюдаемому изменению настройки системы.

Для проверки адекватности теоретических положений проведены модельные исследования электропривода, состоящего из однотипных, одинаковой мощности электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения. За основу принят четырехдвигательный электропривод рабочей клетки непрерывно-заготовочного стана ОАО Западно-Сибирского металлургического комбината (рис. 1).

Номинальные параметры двигателей: напряжение якоря 750 В, ток якоря 1840 А, угловая скорость 60 рад/с, сопротивление якорной цепи 0,03 Ом, электромагнитная постоянная якорной цепи $T_{я} = 0,027$ с, $c\phi = 11,58$.

На схеме (рис. 1) приняты следующие обозначения: $U_{я1}, \dots, U_{я4}$ – напряжения питания якор-

ных цепей; $E_{я1}, \dots, E_{я4}$ – электродвижущие силы; $I_{я1}, \dots, I_{я4}$; M_1, \dots, M_4 – токи и моменты двигателей; 1, ..., 4 – нумерация двигателей.

В блоках 1 выполняется вычисление ($U_{я} - E_{я}$), данная разность подается на блоки 2, отображающие якорные цепи двигателей. В блоках 3 вычисляются значения моментов двигателей M_j . В блоке 4 производится суммирование моментов всех двигателей. Момент нагрузки M_c прикладывается ступенчато (скачком), с задержкой на 0,4 с, чтобы были достигнуты установившиеся режимы к моменту приложения нагрузки. В блоке 5 сигнал нагрузки вычитается из суммарного момента двигателей M_{Σ} и подается на вход блока 6, формирующего сигнал скорости ω . Блоками обратной связи 7 осуществляется вычисление сигнала ($E_{я} = c \phi \omega$).

Напряжение питания подается одинаковым на все двигатели $U_{я} = 750$ В.

Чтобы иметь сопоставимые характеристики, суммарный момент многодвигательного электропривода приведен с уменьшением в четыре раза. Разбросы по магнитным потокам составили: для первого двигателя (+29 %, $c\phi_1 = 14,94$); для третьего (-5 %, $c\phi_3 = 11,00$); для четвертого (+17 %, $c\phi_4 = 13,55$); по сопротивлениям якорных цепей: 1 – (+10 %, $R_1 = 0,033$ Ом, $T_{я1} = 0,0245$ с); 3 – (-10 %, $R_3 = 0,027$ Ом, $T_{я3} = 0,03$ с), 4 – (+6,5 %, $R_4 = 0,032$ Ом, $T_{я4} = 0,0253$ с). За базовые значения приняты данные двигателя 2 ($c\phi_2 = 11,58$, $R_2 = 0,03$ Ом, $T_{я2} = 0,027$ с). Приведенный момент инерции привода - 894 кг·м². Результаты исследований представлены на рис. 2 и 3.

На отрезке времени $t < 0,27$ осуществляется разгон двигателей без нагрузки. При $t = 0,27$ с система выходит на установившийся режим работы. В момент времени $t = 0,4$ с прикладывается нагрузка. Переходный процесс приложения нагрузки заканчивается при $t = 0,55$ с. Далее следует установившийся режим работы под нагрузкой.

С выходом на установившуюся скорость и снижением нагрузки двигателя второй и третий с меньшими потоками возбуждения (более высокими скоростями холостого хода) продолжают рабо-

тать в двигательном режиме, первый и четвертый, имеющие меньшие скорости идеального холостого хода, переходят в генераторный режим, создавая тормозной момент для двигателей, работающих в двигательном режиме. Несмотря на отсутствие нагрузки, все двигатели остаются загруженными.

На распределение нагрузки между двигателями оказывают влияние, как жесткость механической характеристики, так и скорость холостого хода двигателя. Чем выше жесткость механической характеристики и скорость холостого хода, тем большую нагрузку несет двигатель. При равных скоростях холостого хода большую нагрузку всегда несет двигатель с более высокой жесткостью механической характеристики. При одинаковых жесткостях характеристик нагрузка на двигатель тем больше, чем выше скорость ω_0 . В генераторном режиме распределение нагрузок противоположно. В общем случае распределение нагрузок в генераторном режиме зависит от конкретных условий.

На рис. 3 представлены диаграммы нагрузок, при согласованных механических характеристиках, т.е. имеющих равные скорости холостого хода и жесткости. В этом случае обеспечивается равномерное распределение моментов независимо от характера их изменения. Как видно, результаты исследований хорошо согласуются с теоретическими положениями

Выводы

1. Пропорциональность распределения нагрузок в системе многодвигательного привода независимо от условий их изменения обеспечивается выравниванием скоростей холостого хода двигателей. Для распределения нагрузок пропорционально номинальным мощностям необходимо обеспечить нормирование жесткостей характеристик.

2. Равномерное распределение нагрузок между двигателями может быть достигнуто совместным регулированием напряжений питания якорных цепей и обмоток возбуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
2. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. – М.: Высшая школа, 1977. – 391 с.

□ Авторы статьи:

Егоров
Владимир Федорович
- канд.техн.наук, доц. каф.
«Механическое оборудование металлургических заводов» СибГИУ.
Тел. 8(3843)-46-91-97
E-mail: evf@zaoproxy.ru

Егоров
Сергей Владимирович
- руководитель отдела КИПА
ОАО ЗСМК
Тел. 8(3843) - 35-04-93
E-mail: ecv@zaoproxy.ru