

УДК 621.06:62-83

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАГРУЗОК ЦИКЛОВЫХ МЕХАНИЗМОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

В.Ф. Егоров, С.В. Егоров*

Сибирский государственный индустриальный университет

*ОАО «ЗСМК», г. Новокузнецк

E-mail: evf@zaoproxy.ru

Определены способы управления распределением технологических нагрузок механизмов циклического действия в процессе передачи их к валу двигателя при низкой инерционности рабочих масс. Показано, что каждой форме распределения нагрузок соответствует определенное количественное соотношение между их среднеквадратичной величиной и средней. Данный показатель не зависит от физических свойств исследуемой функции, обеспечивает единообразие оценок и может применяться в качестве управляющего параметра при формировании нагрузок.

Ключевые слова:

Распределение нагрузок, управление распределением нагрузок, выравнивание нагрузок.

Key words:

Distribution of loadings, management of distribution of loadings, alignment of loadings.

Развитие энергоемких технологий в условиях дефицита энергетических ресурсов существенно обострило проблему экономии электрической энергии. Удельное потребление энергии на отечественных металлургических предприятиях в 1,5...2 раза выше аналогичных показателей других стран. Отмеченные различия свидетельствуют о значительных резервах энергосбережения и повышения экономической эффективности промышленных предприятий. Важнейшей энергетической базой производственных процессов являются электрические машины, преобразующие более 60 % вырабатываемой в стране электрической энергии в механическую работу, и значение их рационального использования особенно велико. Параметры электродвигателя, его номинальная мощность, потери энергии в процессе электромеханического преобразования во многом зависят от характера распределения прикладываемых нагрузок. Часто рабочая нагрузка осуществляемого технологического процесса изменяется крайне неравномерно (рис. 1 и др.). Резкие перепады вызывают дополнительный нагрев двигателей, увеличивают расход электроэнергии, неблагоприятно сказываются на условиях эксплуатации электрических подстанций, электросетей и других производственных агрегатов, требуют дополнительного повышения надежности источников электроснабжения.

Для выравнивания нагрузок искусственно увеличивают момент инерции подвижных элементов системы, обеспечивающих обмен накапливаемой энергией и преодоления рабочей нагрузки совместно с двигателем. Эффективность такого способа зависит от соотношения длительностей рабочего $t_{\text{раб}}$ и холостого хода $t_{\text{х.х.}}$. При этом время $t_{\text{х.х.}}$ должно быть больше $t_{\text{раб}}$ в 4...5 раз.

Рост объемов производства, необходимость повышения быстродействия механизмов обусловили существенное снижение момента инерции подвижных масс, и увеличение неравномерности ра-

спределения нагрузок. Из-за низкой инерционности рабочих масс использование традиционного способа не обеспечивает их выравнивания.

Изменение условий эксплуатации оборудования, работа с частыми пусками, торможениями, реверсами движения требует новых поисков решения данной проблемы [1–3]. Не разработан критерий количественной оценки неравномерности нагрузок, что затрудняет проведение исследований и принятие необходимых мер по их выравниванию.

Перейдем к рассмотрению этих вопросов.

Правильность выбранного двигателя с переменной нагрузкой проверяют на нагрев по среднеквадратичному току или моменту. Согласно неравенству Буняковского [4]

$$\left(\int_a^b f(x)\varphi(x)dx \right)^2 \leq \int_a^b (f(x))^2 dx \int_a^b (\varphi(x))^2 dx, \quad (1)$$

полагая $f(x)=1$, следует, что нижним пределом среднеквадратичной величины является среднее значение функции. Согласно подынтегральные зависимости с диаграммой нагрузок, авторы предложили использовать данное неравенство (1) для оценки нагрузочных диаграмм, принимая в качестве критерия отношение эквивалентного момента к среднему.

Следует заметить, что принятое условие справедливо лишь в тех случаях, когда работа привода за цикл осуществляется на основной характеристике при скоростях близких к номинальной. При значительных перепадах скорости учитывается ухудшение условий охлаждения двигателя. В этом случае минимальное значение эквивалентной нагрузки не достигает средней величины $\min P_{\text{эк}} > P_{\text{ср}}$.

Таким образом, для оценки неравномерности распределения нагрузок следует принимать отношение между текущей величиной $P_{\text{эк}}$ и минимальным $\min P_{\text{эк}}$ значением эквивалентных нагрузок, а не между $P_{\text{эк}}$ и средней нагрузками $P_{\text{ср}}$, т. е.

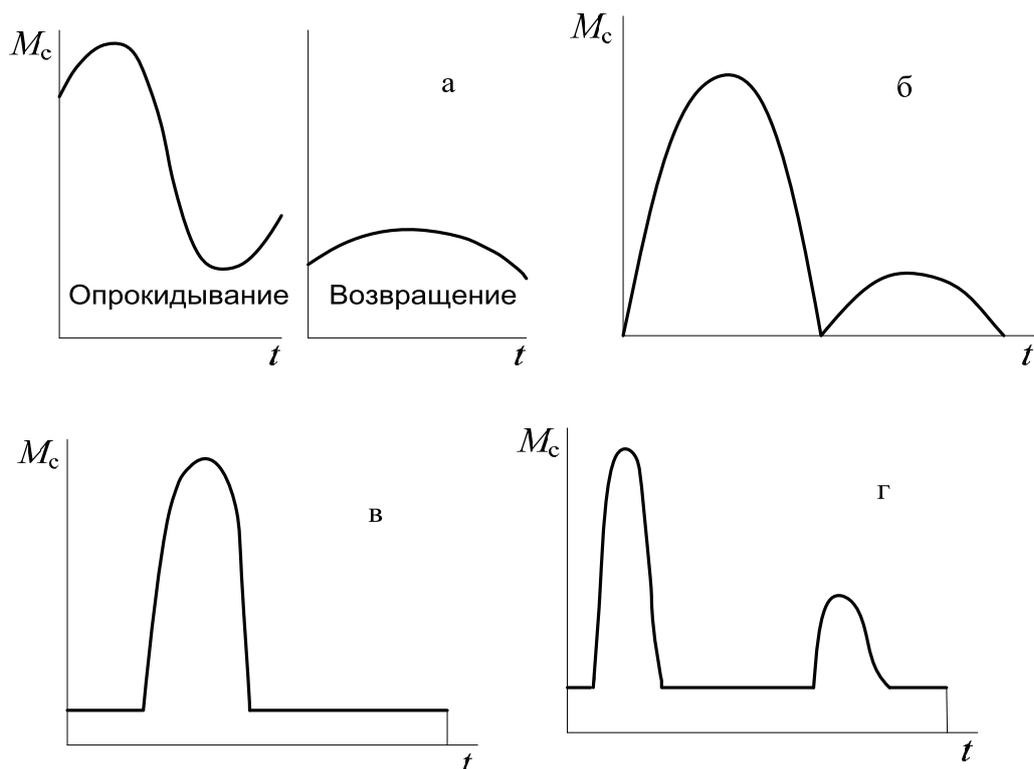


Рис. 1. Диаграммы моментов рабочих механизмов: а) вагоноопрокидывателя; б) рычажного сталквателя; в) кривошипных ножниц; г) штамповочной машины

$$\lambda = \frac{P_{\text{эк}}}{\min P_{\text{эк}}} = \frac{M_{\text{эк}}}{\min M_{\text{эк}}} \geq 1. \quad (2)$$

Или в процентном выражении

$$\varphi = \frac{P_{\text{эк}} - \min P_{\text{эк}}}{\min P_{\text{эк}}} 100 \% = \frac{M_{\text{эк}} - \min M_{\text{эк}}}{\min M_{\text{эк}}} 100 \% = (\lambda - 1) \cdot 100 \% \geq 0, \quad (3)$$

где $P_{\text{эк}}$, P_{cp} – эквивалентная и средняя мощности привода; $M_{\text{эк}}$, M_{cp} – эквивалентный и средний моменты нагрузки.

В качестве примера остановимся на диаграмме со ступенчатым распределением нагрузок. Пусть $M_1, M_2, \dots, M_n, t_{1i}, t_{2j} \dots t_{nk}$ – соответственно нагрузки и длительности первого, второго и последующих участков, тогда

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \sum_{i=1}^l t_{1i} + M_2^2 \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + M_n^2 \sum_{k=1}^q t_{nk}}{\alpha \sum_{i=1}^l t_{1i} + \beta \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + \sum_{k=1}^q t_{nk}}};$$

$$M_{\text{cp}} = \frac{M_1 \sum_{i=1}^l t_{1i} + M_2 \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + M_n \sum_{k=1}^q t_{nk}}{\sum_{i=1}^l t_{1i} + \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + \sum_{k=1}^q t_{nk}}.$$

где α и β – коэффициенты, учитывающие ухудшение условий охлаждения двигателя во время переходных процессов (α) и паузы (β).

Минимальное эквивалентное значение момента соответствует условию, при котором нагрузка равна средней величине за цикл работы.

Следовательно,

$$\min M_{\text{эк}} = M_{\text{cp}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l t_{1i} + \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + \sum_{k=1}^q t_{nk}}{\alpha \sum_{i=1}^l t_{1i} + \beta \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + \sum_{k=1}^q t_{nk}}}.$$

Переходя к (2), находим

$$\frac{M_{\text{эк}}}{\min M_{\text{эк}}} = \frac{\sqrt{\frac{M_1^2 \sum_{i=1}^l t_{1i} + M_2^2 \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + M_n^2 \sum_{k=1}^q t_{nk}}{\alpha \sum_{i=1}^l t_{1i} + \beta \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + \sum_{k=1}^q t_{nk}}}}{M_{\text{cp}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l t_{1i} + \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + \sum_{k=1}^q t_{nk}}{\alpha \sum_{i=1}^l t_{1i} + \beta \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + \sum_{k=1}^q t_{nk}}}} =$$

$$= \frac{1}{M_{\text{cp}}} \sqrt{\frac{M_1^2 \sum_{i=1}^l t_{1i} + M_2^2 \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + M_n^2 \sum_{k=1}^q t_{nk}}{\sum_{i=1}^l t_{1i} + \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + \sum_{k=1}^q t_{nk}}}.$$

Таким образом, отношение $M_{эк}/\min M_{эк}$ соответствует отношению $M_{эк}/M_{ср}$ при одинаковых условиях работы привода на всех участках диаграммы.

Т. е. для оценки неравномерности загрузки двигателя можно эквивалентную нагрузку определять при одинаковых скоростных режимах работы привода без учета ухудшения условий охлаждения. Тогда выражение (3) примет вид

$$\varphi = \left(\frac{1}{M_{ср}} \sqrt{\frac{M_1^2 \sum_{i=1}^l t_{1i} + M_2^2 \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + M_n^2 \sum_{k=1}^q t_{nk}}{\sum_{i=1}^l t_{1i} + \sum_{j=1}^r t_{2j} + \dots + \sum_{k=1}^q t_{nk}}} - 1 \right) \times 100 \%$$

Назовем данный показатель *коэффициентом распределения нагрузок*.

В системах с многодвигательным электроприводом, двигатели которого работают на общий вал, эквивалентный момент нагрузки $M_{эк.мн.}$ равен сумме эквивалентных моментов одиночных двигателей

$$M_{эк.мн.} = \sum_{j=1}^n M_{эк.j} = M_{эк.мн.} \sum_{j=1}^n \alpha_j,$$

где $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$; α_j – весовой коэффициент распределения нагрузок.

Следовательно,

$$M_{эк.j} = M_{эк.мн.} \alpha_j$$

или

$$M_{эк.мн.} = M_{эк.j} / \alpha_j. \tag{4}$$

Так как в пределе $M_{эк.} = M_{ср.}$, то

$$M_{ср.мн.} = M_{ср.j} / \alpha_j. \tag{5}$$

Здесь $M_{эк.мн.}$, $M_{ср.мн.}$ – эквивалентный и средний моменты многодвигательного электропривода; $M_{эк.j}$, $M_{ср.j}$ – эквивалентный и средний моменты одиночных двигателей.

С учетом зависимостей (4) и (5) находим

$$\varphi = \left(\frac{M_{эк.мн.}}{M_{ср.мн.}} - 1 \right) \cdot 100 \% = \left(\frac{M_{эк.j}}{M_{ср.j}} - 1 \right) \cdot 100 \%$$

Таким образом, коэффициент распределения нагрузок многодвигательного привода при пере-

менном статическом моменте соответствует коэффициенту распределения нагрузок в одиночных электродвигателях.

Определим значение коэффициента φ при изменении момента по параболической зависимости $M = c(-t^2 + t_y t)$, (где t – текущее значение времени; t_y – рабочий период; c – масштабный коэффициент Н·м/с²)

$$M_s = c \sqrt{\int_0^{t_y} (-t^2 + t_y t)^2 dt} / t_y = ct_y^2 / \sqrt{30};$$

$$M_{ср} = c \int_0^{t_y} (-t^2 + t_y t) dt / t_y = ct_y^2 / 6;$$

$$\lambda = M_s / M_{ср} = 6 / \sqrt{30} \approx 1,1$$

$$\varphi = (\lambda - 1) \cdot 100 \% = 10 \%$$

Соответственно для каждой формы графика нагрузок существует определенное соотношение между их эквивалентной (среднеквадратичной) величиной и средней.

В табл. 1 в качестве примера приведены значения λ и φ для характерных режимов распределения нагрузок.

Как видно из табл. 1, оценки λ и φ не имеют размерности. Таким образом, можно производить анализ и управление распределением нагрузок без привязки к конкретной физической величине (ток, сила, момент). Для общности результатов анализа преобразуем зависимости, применив к ним линейную аппроксимацию (рис. 2).

При описании ломаной линией выпуклых форм (рис. 2, а) будем иметь

$$\lambda = \frac{2}{1 + \tau_1} \sqrt{\frac{2\tau_1 + 1}{3}}; \tag{6}$$

для вогнутых (рис. 2, б)

$$\lambda = \frac{2}{1 - \tau_1} \sqrt{\frac{1 - \tau_1}{3}}, \tag{7}$$

где $\tau_1 = t_1 / t_y$.

Результаты вычислений λ , а также φ приведены в табл. 2, где $\tau_2 = (t'_{2(n)} + t''_{2(n)}) / t_y$; здесь t_y – общая длительность рабочего периода; M_{max} – максимальный момент нагрузки; $\lambda_m = M_{max} / M_{ср}$.

Сопоставляя значения λ и φ (табл. 1, 2), замечаем, что выпуклые диаграммы нагрузок относитель-

Таблица 1. Анализ неравномерности нагрузок

Форма изменения	Линейная (треугольник)	Выпуклая парабола	Вогнутая парабола	Выпуклая синусоида	Вогнутая синусоида
Нагрузка	kt $0 \leq t \leq t_y$	$c(-t^2 + t_y t)$ $0 \leq t \leq t_y$	$c(t^2 - t_y t + t_y^2 / 4)$ $0 \leq t \leq t_y$	$a \sin t$ $0 \leq t \leq \pi$	$a(1 - \sin t)$ $0 \leq t \leq \pi$
λ	$\frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,15$	$\frac{6}{\sqrt{30}} \approx 1,1$	$\frac{3}{\sqrt{5}} \approx 1,34$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$	$\sqrt{\frac{\pi(3\pi - 8)}{2(\pi - 2)^2}} \approx 1,31$
φ	15 %	10 %	34 %	11 %	31 %

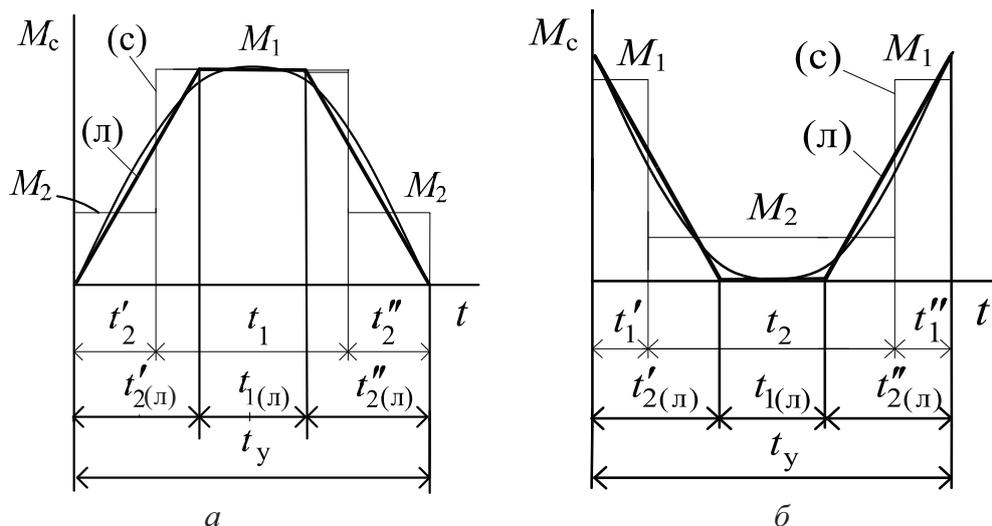


Рис. 2. Приведение выпуклых (а) и вогнутых (б) функций к ступенчатым (с) и описание ломаной линией (л)

но симметричных им вогнутых являются более равномерными. Сглаживание гребня при сохранении соотношения между максимальной и минимальной нагрузками снижает неравномерность, сглаживание впадины – увеличивает.

Для удобства дальнейшего анализа приведем нагрузки к ступенчатому виду (рис. 2, а, б (с)). Пусть $M_2/M_1 = \psi$; $(t'_2 + t''_2)/t_1 = \tau$ – для выпуклых функций; $t_2/(t'_1 + t''_1) = \tau$ – для вогнутых, будем иметь

$$\varphi = \left(\sqrt{1 + \frac{(1-\psi)^2 \tau}{(1+\psi\tau)^2}} - 1 \right) \cdot 100 \% \quad (8)$$

Как следует из формулы (8), степень неравномерности нагрузок зависит, прежде всего, от их соотношения и длительностей периодов. Чем больше перепады нагрузок и длительности участков с малой загрузкой, тем выше неравномерность диаграммы. Если вторая ступень соответствует холостому ходу механизма ($\psi < 1$), то при уменьшении $\varphi \rightarrow 0$, т. е. равномерность распределения нагрузок повышается.

Если второй участок является паузой ($M_2=0$) и, следовательно, $\psi=0$, то $\varphi = (\sqrt{1+\tau} - 1) \cdot 100 \%$. Преобразуя подкоренное выражение, находим

$$1 + \tau = 1 + t_2/t_1 = (t_1 + t_2)/t_1.$$

В данном случае сумма $(t_1 + t_2)$ соответствует времени цикла ($t_{ц}$), где t_1 – рабочее время цикла ($t_в$); t_2 – длительность паузы (t_0).

С учетом принятых соотношений

$$\varphi = (\sqrt{t_{ц}/t_в} - 1) \cdot 100 = (\sqrt{1/\xi} - 1) \cdot 100 \%,$$

где $\xi = t_в/t_{ц}$ – относительная продолжительность включения двигателя.

Таким образом, с уменьшением относительной продолжительности включения неравномерность нагрузок увеличивается. Интенсивный рост пока-

зателя неравномерности наблюдается при значениях $\xi \leq 0,25$, что соответствует области широко используемых режимов работы приводов.

Таблица 2. Влияние формы нагрузочных диаграмм на неравномерность нагрузок

1. Выпуклые функции		τ_1	τ_2	λ	λ_m	$\varphi, \%$
	λ	0	1	1,15	2	15
		0,2	0,8	1,14	1,67	14
		0,4	0,6	1,11	1,43	11
		0,6	0,4	1,07	1,25	7
		0,8	0,2	1,03	1,11	3
		1	0	1	1	0
2. Вогнутые функции		τ_1	τ_2	λ	λ_m	$\varphi, \%$
	λ	0	1	1,15	2	15
		0,2	0,8	1,29	2,5	29
		0,4	0,6	1,49	3,33	49
		0,6	0,4	1,82	5,00	82
		0,8	0,2	2,58	10	158
		0,9	0,1	3,65	20	265

Исследуем возможность выравнивания нагрузок с применением передач. В качестве примера рассмотрим условия резки металла на ножницах с кривошипным механизмом (рис. 1, в). Процесс резания и возвращение ножей в исходное положение осуществляется за каждый оборот эксцентрикового вала. Угол рабочего хода составляет 20...30 % от общего угла поворота. Момент холостого хода не превышает 15...20 % момента в период резания.

Приведем диаграмму исходных нагрузок к виду (рис. 3), полагая, что статический момент, соответствующий разрезанию металла, изменяется скачком. Выберем функцию передаточного числа при следующих условиях работы механизма: $M_{1т} = 1$ кН·м; $M_{2т} = 0,2$ кН·м; $t_{10} = 0,4$ с; $t_{20} = 1,2$ с;

$\alpha_{1T} = \pi/2$; $\alpha_{2T} = 3\pi/2$; $u_0 = 1$, где (α – угловое перемещение, рад; индексами «0» и «Т» обозначены соответственно значения параметров исходной системы и тихоходного вала механизма).

Полагая $M_{2T}/M_{1T} = \psi_T$; $t_{20}/t_{10} = \tau_0$; $u_2/u_1 = \bar{u}$, находим

$$\phi = \left(\sqrt{1 + \frac{(1 - \psi_m)^2 \tau_0}{(1 + \psi_m \tau_0)^2}} - 1 \right) \cdot 100 \% =$$

$$= \left(\sqrt{1 + \frac{(1 - 0,2)^2 \cdot 3}{(1 + 0,2 \cdot 3)^2}} - 1 \right) \cdot 100 \% = 33 \%;$$

$$t_{10} + t_{20} = 1,6 \text{ с.}$$

При выровненных нагрузках $\phi = 0$. В данном случае $\psi_T/\bar{u} = 1$, $\bar{u} = u_2/u_1 = 0,2$.

Для сохранения быстродействия механизма среднее передаточное число за цикл работы должно быть равно 1. Согласно данному условию находим

$$u_{cp} = (u_1 \varphi_{1T} + u_2 \varphi_{2T}) / (\varphi_{1T} + \varphi_{2T}) = 1.$$

Отсюда $u_1 = 2,5$; $u_2 = 0,5$.

Проверим требование сохранения быстродействия: $t_{10}u_1 + t_{20}u_2 = 0,4 \cdot 2,5 + 1,2 \cdot 0,5 = 1,6$ с. Быстродействие выполняется.

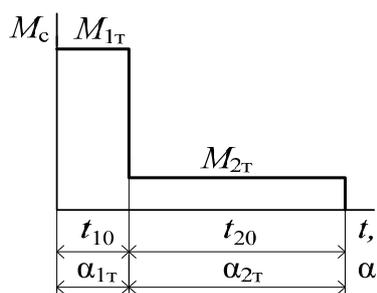


Рис. 3. Нагрузочная диаграмма ножниц при работе в статическом режиме

Таким образом, при изменении передаточного числа пропорционально изменению величины момента, неравномерность нагрузок устраняется. Рабочие нагрузки составят на первом участке $M_{1T}/u_1 = 1/2,5 = 0,4$ кН·м; на втором участке $M_{2T}/u_2 = 0,2/0,5 = 0,4$ кН·м, т. е. в данном случае нагрузка полностью выравнивается. Снижение не-

равномерности и выигрыш мощности двигателя составляет 33 %.

Выравнивание нагрузок также возможно регулированием радиуса силовых звеньев привода: барабана лебедки, ведущих звездочек, кривошипа и т. д.

Допустим, что моменты от действующих сил Q_i соответственно равны:

$$M_1 = Q_1 r_1, \dots, M_i = Q_i r_i, \dots, M_n = Q_n r_n.$$

Выравнивание моментов обеспечивается при соотношении радиусов

$$r_i/r_1 = Q_1/Q_i, \dots, r_n/r_1 = Q_1/Q_n.$$

Выразим нагрузки через начальные (с индексом «0») значения моментов. Принимая во внимание

$$M_{i0} = Q_i r_0, \dots, M_{i0} = Q_i r_0, \dots, M_{n0} = Q_n r_0,$$

находим

$$Q_i/Q_j = M_{i0}/M_{j0}, \dots, Q_1/Q_n = M_{n0}/M_{10}.$$

Заменив отношение нагрузок отношением радиусов, получаем

$$r_i/r_1 = M_{i0}/M_{10}, \dots, r_n/r_1 = M_{n0}/M_{10}.$$

Т. е. для выравнивания моментов нагрузки необходимо, чтобы радиусы силовых элементов изменялись пропорционально изменению величины моментов.

Выводы

Предложена количественная оценка неравномерности распределения нагрузок, основанная на сравнении их среднеквадратичного и среднего значений за цикл работы механизма.

Управление распределением нагрузок (их выравнивание) при низких значениях момента инерции подвижных масс механизма обеспечивается варьированием передаточного числа в соответствии с изменением величины прикладываемого момента, регулированием радиуса силовых элементов привода: барабана лебедки, блоков, звездочек и др.

Повышению равномерности распределения нагрузок способствует увеличение относительной продолжительности включения привода, а также снижение длительности периодов и числа участков холостого хода механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский И.Я. О возможностях энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов // Электротехника. – 1988. – № 8. – С. 2–6.
2. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. – М.: Высшая школа, 1977. – 391 с.

3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
4. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Физматгиз, 1977. – 870 с.

Поступила 23.12.2009 г.