УДК 62-231 : 669.02/.09

МЕТОД И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НАГРУЗОК

Егоров Владимир Федорович,
канд. техн. наук, доцент, E-mail: evf@zaoproxy.ru
Дворников Леонид Трофимович,
докт. техн. наук, проф., E-mail: evf@zaoproxy.ru
Перетятько Владимир Николаевич,
-докт. техн. наук, проф., E-mail: evf@zaoproxy. ru.

Сибирский государственный индустриальный университет 654007, Россия, Кемеровская область, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Аннотация. *Предложен метод анализа качества нагрузочных диаграмм цикловых машин металлургического производства обеспечивающий однозначность и универсальность проводимой оценки.*

Ключевые слова: *нераномерность, метод, критерий, оценка*

Экономичность использования приводного двигателя во многом зависит от характера изменения действующих нагрузок, значительные перепады которых приводят к увеличению потерь энергии, росту номинальной мощности, габаритов, весу, повышению эксплуатационных затрат. Возникает необходимость в увеличении коммутационных аппаратов, сечений проводов и т.д.

Результаты расчета деталей машин по эквивалентным и средним напряжениям указывают на возможность существенного снижения их размера и массы с выравниванием нагрузок. Двукратное снижение усилия при одноосном напряженном состоянии позволяет снизить массу детали вдвое. При действии изгибающего или крутящего моментов диаметр вала уменьшается в 1,26 раза, его масса в 1,6, а величина момента инерции в 2,5 раза. Снижаются модуль и размеры зубчатых колес, что в среднем приводит к уменьшению массы и размеров редуктора в 1,3 – 1,4 раза.

При резких перепадах (пиковом характере) нагрузок во время технологической операции с целью снижения их неравномерности искусственно увеличивают момент инерции системы. Участие инерционных масс помогает преодолевать нагрузку в период рабочей операции, разгружая тем самым двигатель, а во время холостого хода создает дополнительное сопротивление. Это уменьшает затраты электроэнергии двигателя и его номинальную мощность. Но, увеличение момента инерции эффективно лишь, когда время холостого хода механизма t_{xx} больше времени рабочей операции t_{on} не менее чем в 4 –5 раз.

Возросшая интенсивность работы оборудования, сокращение длительности пауз, совершенствование конструкции двигателей привели к снижению использования дополнительных инерционных масс. Значительная часть современных производственных машин работает преимущественно в переходных процессах с большим числом включений в час, с частым изменением скоростей и направлений движения. Поэтому стремятся к максимальному снижению массы и момента инерции оборудования. Из-за низких значений момента инерции не обеспечивается выравнивание нагрузок традиционными способами. Пиковые значения моментов преодолеваются за счет перегрузочной способности двигателя, что приводит к увеличению его рабочей мощности и потерь энергии.

Наращивание объемов производства, изменение условий работы машин, увеличивающиеся темпы затрат энергии на единицу производимой продукции нуждаются в качественно новых решениях выдвигаемых задач [1], [2]. Отсутствие эффективной оценки неравномерности нагрузок затрудняет данные исследования.

Расчет деталей на сопротивление усталости (износ, нагрев и долговечность), выбор мощности двигателя проводят по эквивалентным нагрузкам, т.е по таким нагрузкам стационарного режима, которые вызывают ту же степень усталостного повреждения детали, либо износа двигателя в течении устанавливаемого срока службы, как и фактически действующая нестационарная нагрузка. Это нормативная нагрузка рабочего состояния, включающая динамические и другие объективные условия, возникающие при использовании механизмов, и электродвигателей с учетом действительного режима работы.

Неравномерность нагрузок двигателя. Правильность выбранного двигателя с переменным характером нагружения оценивают по эквивалентному моменту.

Известно [3, 4], что снижение неравномерности нагрузок приводит к уменьшению энергозатрат и номинальной мощности машины. Таким образом, при снижении неравномерности нагрузок за счет более эффективной загруженности двигателя и рабочих элементов имеется возможность снижения металлоемкости, повышения надежности и производительности цикловых машин. Для успешного

применения этих положений, позволяющих заложить перспективы практической реализации, необходимо установить эффективность от повышения равномерности рабочих нагрузок, найти законы для ее определения, учитывающие не только текущее положение, но и доступные возможности. Данный способ должен количественно и однозначно характеризовать изменения, вызванные преобразованием нагрузок, независимо от их физических свойств. Решение поставленных задач позволило разработать универсальный метод оценки условий неравномерности, приемлемый для анализа как статических, так и переходных процессов в системах с одиночным и с многодвигательным приводами.

В качестве основного показателя принята энергетическая эффективность работы машины. Энергозатраты определяются по загрузке двигателей. Анализ мощности двигателя возможен только на основе нагрузочной диаграммы самого двигателя $M_д(t)$, $P_д(t)$. В начальной стадии в распоряжении конструктора имеется лишь нагрузочная диаграмма механизма, представляющая зависимость статического момента от времени $M_c(t)$. Нагрузки двигателя отличаются от статических на величину динамической составляющей. Поэтому на основе диаграммы механизма необходимо построить нагрузочную диаграмму двигателя. Дальнейшая реализация метода производится в следующей последовательности:

1. В соответствии с технологическим процессом строится диаграмма механизма. Статические нагрузки с учетом затрат энергии при передаче сил приводятся к валу двигателя.

2. После выбора двигателя определяется общий момент инерции системы, приведенный к валу двигателя.

3. Выполняется расчет переходных процессов и строится нагрузочная диаграмма двигателя.

4. По нагрузочной диаграмме определяются среднеквадратичные (эквивалентные) значения момента ($M_{эк}$) или мощности ($P_{эк}$) при текущих режимах.

5. Затем строится нагрузочная диаграмма электродвигателя при условии

полного выравнивания статических нагрузок и вычисляются среднеквадратичные значения момента, мощности, соответствующие минимальному технически необходимому уровню для выполнения полезной работы $minM_{эк}, minP_{эк}$.

6. По отношеним $P_{эк}/minP_{эк}$, $M_{эк}/minM_{эк}$, определяется эффективность работы машины.

Таким образом, анализ неравномерности нагрузок может производиться на основе показателей, представляющих критерии энергетической эффективности эксплуатации привода:

$$\lambda = \frac{P_{эк}}{minP_{эк}} = \frac{M_{эк}}{minM_{эк}} \geq 1. \qquad (1)$$

Или в процентном выражении:

$$\varphi = \frac{P_{эк} - minP_{эк}}{minP_{эк}} 100 = \frac{M_{эк} - minM_{эк}}{minM_{эк}} 100 = . \qquad (2)$$
$$= (\lambda - 1) \cdot 100\% \geq 0$$

Рассмотрим нагрузочную диаграмму двигателя ступенчатого вида. Пусть $M_{c1}, M_{c2}, \ldots M_{cr}, t_1, t_2 \ldots t_r$ – соответственно статические нагрузки и длительности первого, второго и последующих участков. Тогда эквивалентный момент и средняя статическая нагрузка соответственно равны:

$$M_{эк} = \sqrt{\frac{M_{n.пр}^2 \sum_{i=1}^{l} t_i + M_{c1}^2 t_1 + M_{c2}^2 t_2 + \ldots + M_{cj}^2 t_j + \ldots + M_{cr}^2 t_r}{\alpha \sum_{i=1}^{l} t_i + \sum_{j=1}^{r} t_j + \beta \sum_{k=1}^{q} t_k}}; \qquad (3)$$

$$M_{ср.с} = \frac{\left[M_{c1} t_1 + M_{c2} t_2 + \ldots + M_{cj} t_j + \ldots + M_{cr} t_r \right]}{\sum_{j=1}^{r} t_j},$$

где $M_{n.пр}$ – момент переходных процессов;

$M_{ср.с}$ – средний статический момент нагрузки;

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 в установившемся режиме нагрузка равна средней величине за время работы.

Следовательно,

$$minM_{эк} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{l} M_{n.пpi}^2 t_i + M_{ср.с}^2 \sum_{j=1}^{r} t_j}{\alpha \sum_{i=1}^{l} t_i + \sum_{j=1}^{r} t_j + \beta \sum_{k=1}^{q} t_k}} \qquad (4)$$

С учетом (3), находим:

$$\frac{M_{эк}}{minM_{эк}} = \sqrt{\frac{\left\{ \sum_{i=1}^{l} M_{n.пpi}^2 t_i + M_{c1}^2 t_1 + M_{c2}^2 t_2 + \ldots + M_{cj}^2 t_j + \ldots + M_{cr}^2 t_r \right\}}{\alpha \sum_{i=1}^{l} t_i + \sum_{j=1}^{r} t_j + \beta \sum_{k=1}^{q} t_k}} \Big/$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{l} M_{n.пpi}^2 t_i + M_{ср.с}^2 \sum_{j=1}^{r} t_j}{\alpha \sum_{i=1}^{l} t_i + \sum_{j=1}^{r} t_j + \beta \sum_{k=1}^{q} t_k}}$$

т.е.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^{l} M_{n.npi}^2 t_i + M_{c1}^2 t_1 + M_{c2}^2 t_2 + \ldots + M_{cj}^2 t_j + \ldots + M_{c\,r}^2 t_r\right]}{\sum_{i=1}^{l} M_{n.npi}^2 t_i + M_{cp.c}^2 \sum_{j=1}^{r} t_j}} \quad (5)$$

Выражение (2) при этом принимает вид:

$$\varphi = \left(\sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^{l} M_{n.npi}^2 t_i + M_{c1}^2 t_1 + M_{c2}^2 t_2 + \ldots + M_{cj}^2 t_j + \ldots + M_{c\,r}^2 t_r\right]}{\sum_{i=1}^{l} M_{n.npi}^2 t_i + M_{cp.c}^2 \sum_{j=1}^{r} t_j}} - 1\right) \cdot 100\ \% \quad . \quad (6)$$

Если продолжительность переходных процессов мала и отношение $\sum_{i=1}^{l} M_{n.npi}^2 t_i$ к $\sum_{j=1}^{r} M_{cj}^2 t_j$ не. превышает 15% от, то, пренебрегая влиянием переходных процессов, находим:

$$\lambda = \frac{1}{M_{cp.c}} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{r} M_{cj}^2 t_j}{\sum_{j=1}^{r} t_j}} \quad ;$$

$$\varphi = \left(\frac{1}{M_{cp.c}} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{r} M_{cj}^2 t_j}{\sum_{j=1}^{r} t_j}} - 1\right) \cdot 100\ \% \quad (7)$$

Так, отношение $M_{эк}/minM_{эк}$ в установившихся режимах движения соответствует отношению $M_{эк}/M_{ср}$ при одинаковых условиях охлаждения двигателя на всех участках диаграммы. Следовательно, для оценки неравномерности загрузки двигателя в статическом режиме эквивалентную нагрузку можно определять без учета ухудшения условий охлаждения согласно (5), (6).

В настоящее время оценка неравномерности нагрузочных диаграмм осуществляется на основе средних ($M_{ср.с.}$) или среднеквадратичных ($M_{кв.с.}$) значений статического момента за рабочий период цикла [5]:

Известны следующие зависимости для оценки номинального момента двигателя:

$$\frac{M_н}{M_{ср.с.}} \geq k\,; \quad (8)$$

$$\frac{M_н}{M_{ср.с.}} \geq \frac{1 + M_{кв.с.}/M_{ср.с.}}{2} = k\,; \quad (9)$$

$$\frac{M_н}{M_{ср.с.}} \geq \sqrt{M_{кв.с.}/M_{ср.с.}} = k\,, \quad (10)$$

где $M_н$ – номинальный момент двигателя;

В качестве основного показателя принято соотношение между номинальной ($M_н$) и средней за цикл статической нагрузкой двигателя ($M_{ср.с.}$).

В отличие от известных в представленном методе используется отношение среднеквадратичной за цикл нагрузки при текущих режимах и при выровненной статической нагрузке

$$\lambda = \frac{P_{эк}}{minP_{эк}} = \frac{M_{эк}}{minM_{эк}} \geq 1 \cdot$$

С целью уточнения различий методов и качества их оценки рассмотрим следующую нагрузочную диаграмму двигателя (рисунок).

Среднеквадратичный момент нагрузки за цикл работы с учетом переходных процессов и ухудшения условий охлаждения двигателя при понижении скорости вращения:

$$M_{кв.} = \sqrt{\frac{M_n^2 t_n + M_m^2 t_m + M_{c1}^2 t_{c1} + M_{c2}^2 t_{c2}}{\alpha(t_n + t_m) + t_{c1} + t_{c2}}} =$$

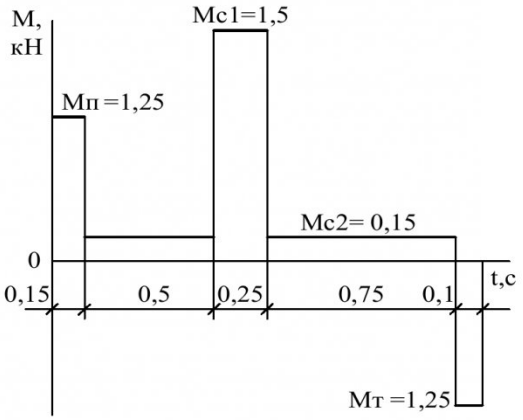
$$= \sqrt{\frac{1{,}25^2 \cdot 0{,}15 + 1{,}25^2 \cdot 0{,}1 + 1{,}5^2 \cdot 0{,}25 + 0{,}15^2 \cdot 1{,}25}{0{,}75(0{,}15 + 0{,}1) + 0{,}25 + 1{,}25}}$$

$= 0{,}762$ кН · м

,где t_n, t_m, t_c – время пуска (n), торможения (m), установившегося движения (c);

α – коэффициент ухудшения условий охлаждения двигателя.

Среднеквадратичный момент статической нагрузки за цикл работы: $M_{кв.с} = 0{,}584$ кН·м.



Нагрузочная диаграмма двигателя: время цикла $t_ц = 1{,}75$ с, . M_n, M_m, M_c – моменты пусковой (п), тормозной (m) и статический (c)

Среднее значение статического момента за цикл работы $M_{ср.с.}$ = 0,343 кН·м.

Минимальное значение среднеквадратичного момента при выровненном статическом моменте $minM_{кв.}$ = 0,597 кН·м.

Произведем расчет неравномерности нагрузок в соответствии с вышеизложенными рекомендациями. Номинальный момент принимаем равным среднеквадратичному моменту нагрузки:

$M_{кв.}$ = 0,762 кН·м.

Согласно з (8) $k_1 = \frac{M_н}{M_{ср.с.}} = \frac{0,762}{0,343} = 2,22$.

В соответствии с (9), (10)

$$k_2 = \frac{1 + M_{кв.с.}/M_{ср.с.}}{2} = 1,35,$$

причем $M_{н2} = M_{ср.с}\, k_2$ = 0,343·1,35=0,463<< $M_{кв}$;

$$k_3 = \sqrt{M_{кв.с.}/M_{ср.с.}} = 1,3,$$

при этом $M_{н3}$ = 0,343·1,3= 0,446<< $M_{кв}$.

Второй и третий случаи весьма отдаленно характеризуют неравномерность нагрузок и не могут быть использованы для анализа, так как значения номинальных моментов в соответствии с данными условиями значительно ниже эквивалентных.

При оценке неравномерности нагрузок предлагаемым

методом находим:

$$\lambda = \frac{M_{эк.}}{minM_{эк.}} = \frac{0,762}{0,597} = 1,27,$$

$M_{эк.} = M_н = minM_{эк}\cdot\lambda$ = 0,762 кН·м.

Следует заметить, что, представленная оценка неравномерности нагрузочной диаграммы в отличие от второго и третьего способов выполнена с учетом режимов пуска и торможения. Если влиянием переходных процессов пренебречь, то коэффициент неравномерности составит:

$\lambda = M_{эк.с.}/ M_{ср.с.}$ = 0,584/0,343 = 1,69.

Согласно (8) показатель неравномерности нагрузок составит:

$$k_1 = \frac{M_н}{M_{ср.с.}} = \frac{(1,15)M_н}{M_{ср.с.}} = 1,94 > \lambda = 1,69$$

т.е. неравномерность нагрузок по варианту 1 существенно разнится в зависимости от выбранного двигателя, а не от его фактической загруженности.

В предлагаемом методе оценки неравномерности нагрузок отклонение номинального момента от минимально необходимого не влияет на показатель неравномерности нагрузок, т.к. сопоставляются текущие и усредненные эквивалентные нагрузки (а не принятые номинальные моменты двигателя), это обеспечивает однозначность и объективность результата оценки, что позволяет прогнозировать и создает возможность целенаправленного преобразования нагрузок в соответствии с эксплуатационными показателями цикловых машин металлургического производства.

Известные решения не обеспечивают необходимой точности и единства результата.

Представленный метод количественной оценки неравномерности нагрузок и энергозатрат цикловых машин металлургического производства ***отличается от известных использованием отношений эквивалентных мощностей (моментов) текущих режимов и соответствующих значений при максимально выровненных нагрузках, что обеспечивает его однозначность и универсальность применения для анализа цикловых машин с использованием любых кинематических схем, различных режимов работы с одиночными и многодвигательными приводами.***

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хохлов Ю.И.* Плавное электронное управление компенсированной реактивной нагрузкой // Энергосбережение на промышленных предприятиях: материалы II Международной научно-технической конференции;. – Магнитогорск, 2000./ С. 253 – 257.

2. *Чиликин М.Г.* Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с.

3. *Андреев В.П.* Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – М. –Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.

4. *Харизоменов И.В.* Электрооборудование кузнечно-штамповочных машин – М: Высшая школа, 1970. – 186 с.

5. *Гребеник В.М.* Расчет металлургических машин и механизмов / В.М. Гребенник, Ф.К. Иванченко, В.И. Ширяев – Киев: Вища школа, 1988.– 417 с.

Поступило в редакцию26.06.2015

UDC 62-231 : 669.02/.09

METHOD AND CRITERIA OF EVALUATION OF UNEVEN LOADS

Egorov Vladimir F.,
C. Sc. in Engineering, Associate Professor, e-mail: evf@zaoproxy.ru
Dvornikov Leonid T.,
D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: evf@zaoproxy.ru
Peretyatko Vladimir N.,
D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: evf@zaoproxy. ru

Siberian State industrial University. 42 street Kirov, Novokuznetsk, Kemerovo region, 653033, Russian Federation

Abstract.*The method of the analysis of the quality of the load diagrams of cyclic machines of metallurgical production provides the uniqueness and universality of the current assessment.*

Keywords: *prenominate, method, criteria, evaluation*

REFERENCES

1. Hohlov Ju.I. Plavnoe jelektronnoe upravlenie kompensirovannoj reaktivnoj nagruzkoj // Jenergosberezhenie na promyshlennyh predprijatijah: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konf;. – Magnitogorsk, 2000. – S. 253 – 257.

2. Chilikin M.G. Obshhij kurs jelektroprivoda / M.G. Chilikin, A.S. Sandler – M. : Jenergoizdat, 1981. – 576 s.

3. Andreev V.P. Osnovy jelektroprivoda / V.P. Andreev, Ju.A. Sabinin. – M. –L. : Gosjenergoizdat, 1963. – 772 s.

4. Harizomenov I.V. Jelektrooborudovanie kuznechno-shtampovochnyh mashin – M: Vysshaja shkola, 1970. – 186 s.

5. Grebenik V.M. Raschet metallurgicheskih mashin i mehanizmov / V.M. Grebennik, F.K. Ivanchenko, V.I. Shirjaev – Kiev: Vishha shkola, 1988.– 417 s.

Received: 26.06.2015