Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCIV, 1982 г.

УДК 621.313.333:622

# ИССЛЕДОВАНИЕ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ГОРНЫХ КОМБАЙНОВ

Я.П.ГРИНБЕРГ

Асинхронные электродвигатели горных комбайнов работают в условиях резкопеременных нагрузок, параметры которых могут быть описаны только методами случайных функций.

Спектральный состав графика нагрузки, по данным многих исследований [2], имеет широкую полосу, достигающую на верхних частотах 200-250 $с^{-1}$. Типовые испытания комбайновых электродвигателей производятся при статической нагрузке. Производственные испытания в подземных условиях из-за сложности их организации не дают возможности полностью исследовать энергетические показатели, в том числе КПД, $\cos\varphi$ и, соответственно, их влияние на режимные параметры. С другой стороны, до настоящего времени нет единого мнения о форме механической характеристики электродвигателей горных комбайнов. Решение этих задач стало возможным на стенде, моделирующем реальные машины или исследующем непосредственно реальные.

В лаборатории кафедры электрических машин и автоматизированного привода ЛПИ была разработана схема электродинамической модели (ЭДМ) привода горного комбайна [3]. С учетом критериев подобия на ЭДМ моделируется реальный комбайновый электродвигатель ЭДКОН-2М. Схема ЭДМ дает возможность моделировать реальный характер нагрузок и исследовать реальные параметры электродвигателя.

Передаточная функция по возмущению асинхронного электродвигателя при работе с $M_c < 0{,}8M_к$ может быть записана [5] как

$$\frac{M(p)}{M_c(p)} = \frac{1}{T^2p^2 + 2\varepsilon T_p + 1}, \qquad (1)$$

где $T = \sqrt{T_м T_э}$;

$\varepsilon$ – коэффициент демпфирования,

$$\varepsilon = \frac{s_к \omega_0}{2\Omega_0};$$

$T_м$ – электромеханическая постоянная времени,

$$T_м = \frac{J\omega_0 s_к}{2pM_к};$$

$T_э$ – электромагнитная постоянная времени,

$$T_э = \frac{1}{\omega_0 s_к}.$$

Электродвигатели угольных комбайнов выпускаются двух типоразмеров с высотой корпуса 400 и 500 мм. Соответственно моменты инерции с учетом приведенных масс исполнительного органа составляют $J_1$ = I,I кг·м$^2$ и $J_2$ = = 3,3 кг·м$^2$.

Таблица 1

Параметры передаточной функции серийно выпускаемых электродвигателей угольных и проходческих комбайнов

| Тип электродвигателя | $J$, кг·м$^2$ | $M_к$, Н·м | $\Omega_0$, с$^{-1}$ | $s_к$ | $\delta$ |
|---|---|---|---|---|---|
| ЭДК4-1М | 1,1 | 990 | 60 | 0,096 | 0,27 |
| ЭДК04-4М | 1,1 | 1920 | 83 | 0,110 | 0,21 |
| ЭДК04Р-МК | 1,1 | 1650 | 78 | 0,100 | 0,20 |
| ЭДК05-5Р | 3,3 | 2455 | 55 | 0,090 | 0,26 |
| ЭДК04-5А | 1,1 | 2600 | 97 | 0,160 | 0,26 |
| ВАО 102-6 | 9,0 | 3920 | 51 | 0,070 | 0,22 |

Из табл.I видно, что электродвигатели горных комбайнов выпускаются с весьма низким демпфированием и переходные процессы при резких изменениях нагрузки существенно усиливаются. На ЭДМ были проведены исследования влияния динамических параметров электродвигателей на их энергетику (КПД, cos$\varphi$, нагрев). Для получения сопоставимых данных исследования проводились при неизменной величине среднего момента сопротивления на валу модельного двигателя. Варьируемым параметром явилась переменная составляющая момента сопротивления.

Оценка степени неравномерности графика нагрузки производилась по коэффициенту формы

$$k_ф = \frac{I_э}{I_c}, \qquad (2)$$

где $I_э$ – эффективный ток за время испытания; $I_c$ – средний ток.

Комплектом приборов фиксировались интегральные показатели режима работы: активная и реактивная мощности, эффективный ток, напряжение. Встроенными термопарами регистрировалась температура перегрева обмотки (табл.2).

Таблица 2

Результаты измерений

| $I_c$, А | $I_э$, А | $k_ф$ | $k_н$ | $\eta_{изм}$ | $\eta_{расч}$ | $\tau^*$ | $\sqrt{\tau^*}$ | $\eta_{изм} \times \cos\varphi_{изм}$ | $\frac{\eta_- \cos\varphi_-}{\eta_\sim \cos\varphi_\sim}$ | $\cos\varphi_{изм}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 16,70 | 16,70 | 1 | 1 | 0,830 | 0,830 | 1 | 1 | 0,592 | 1 | 0,718 |
| 17,07 | 17,63 | 1,030 | 1,024 | 0,820 | 0,820 | 1,05 | 1,024 | 0,549 | 1,077 | 0,670 |
| 17,60 | 19,12 | 1,086 | 1,054 | 0,800 | 0,800 | 1,24 | 1,114 | 0,535 | 1,106 | 0,669 |
| 18,37 | 20,68 | 1,126 | 1,100 | 0,787 | 0,782 | 1,44 | 1,200 | 0,510 | 1,16 | 0,648 |
| 18,45 | 20,80 | 1,130 | 1,105 | 0,745 | 0,760 | 1,40 | 1,178 | 0,504 | 1,17 | 0,676 |
| 20,10 | 25,63 | 1,275 | 1,200 | 0,700 | 0,695 | 2,02 | 1,420 | 0,415 | 1,425 | 0,595 |

Коэффициент $k_н = I_{c\sim}/I_-$ с увеличением неравномерности нагрузки возрастает, свидетельствуя об увеличении математического ожидания потребляемого тока, что, в свою очередь, должно привести к снижению КПД двигателя.

Аналитически фактическое значение КПД, по сравнению с паспортным $\eta_н$, при постоянном значении момента на валу двигателя может быть вычислено по формуле

$$\eta_{расч} = \frac{\eta_н}{k_ф^2 k_н^2 (1 - \eta_н) + \eta_н}. \qquad (3)$$

Расчетные и измеренные значения КПД практически совпадают.

Увеличение среднего значения потребляемого тока при переменной нагрузке приводит к пропорциональному снижению $\cos\varphi$. Зависимость $\eta\cos\varphi$ в функции коэффициента формы графика нагрузки может, на основании экспериментальных данных, быть записана в относительных единицах:

$$(\eta\cos\varphi)^* = 1 + 1{,}1(k_ф - 1). \qquad (4)$$

Снижение КПД и $\cos\varphi$ при неравномерной нагрузке должно привести к существенному возрастанию перегрева приводного электродвигателя. При резкопеременной нагрузке относительный перегрев $\tau^*$, по сравнению с перегревом при постоянной нагрузке, может быть записан так:

$$\tau^* = \left(\frac{\eta_- \cos\varphi_-}{\eta_\sim \cos\varphi_\sim}\right)^2. \qquad (5)$$

При постоянной нагрузке $\tau^* = 1$, индекс „–" соответствует постоянной нагрузке, „~" – переменной.

При исследованиях на ЭДМ соотношение (5) подтвердилось. Значения в графах 9 и 11 табл.2 отличаются несущественно. Таким образом, при резкопеременной нагрузке работа электродвигателя данного комбайна сопровождается снижением КПД и $\cos\varphi$, что приводит к дополнительному нагреву двигателя, находящемуся в квадратичной зависимости от относительного снижения указанных параметров.

До настоящего времени этот факт не учитывался и расчет возможной производительности горного комбайна, производимый по энергетической характеристике $P_2 = f(v_{\text{п}})$, давал существенно завышенные результаты.

Рассмотрим асинхронный электродвигатель как звено второго порядка из выражения (I). Существенное снижение энергетических показателей объясняется переходными процессами, являющимися результатом резкопеременной нагрузки, и низкими коэффициентами демпфирования $\varepsilon$. В работе [4] приведены значения $\varepsilon$ для серийно выпускаемых электродвигателей горных машин.

Для наиболее распространенных электродвигателей $\varepsilon < 0{,}3$. При таких значениях следует ожидать существенного усиления переходных процессов, которые и оказывают влияние на величину коэффициента формы $k_{\Phi}$ и коэффициента нелинейности. Это приводит не только к существенному дополнительному нагреву электродвигателей, но и к повышенному механическому износу изоляции от электродинамических усилий в обмотках, связанных с электромагнитными и электромеханическими переходными процессами. Снижение величины переходных процессов должно идти по пути оптимизации динамических параметров (оптимизации демпфирующей способности самого электродвигателя).

Используя известные аналитические выражения спектрального состава нагрузки [2] и передаточную функцию двигателя (I), согласно преобразованию Персиваля можно получить аналитическую зависимость дисперсии электромагнитного момента двигателя от дисперсии момента сопротивления:

$$D_{M_{\text{д}}} = D_{M_{\text{с}}} \frac{\alpha + 2\varepsilon\Omega_0}{4\varepsilon^2\alpha + 2\varepsilon\Omega_0 + \frac{2\varepsilon\alpha^2}{\Omega_0}}, \qquad (6)$$

где $\alpha = 200\text{–}1000\ c^{-1}$ – показатель затухания корреляционной функции момента сопротивления [I].

Выражение (6) получено, исходя из того, что корреляционная функция момента сопротивления имеет случайную составляющую амплитуды гармонической составляющей момента сопротивления. Из выражения (6) следует, что дисперсия электромагнитного момента двигателя существенно зависит от коэффициента демпфирования электродвигателя. Выражение (6) может быть записано так:

$$\frac{D_{M_{\text{д}}}}{D_{M_{\text{с}}}} = \frac{\alpha + 2\varepsilon\Omega_0}{4\varepsilon^2\alpha + 2\varepsilon\Omega_0 + \frac{2\varepsilon\alpha^2}{\Omega_0}} = k_{\text{д}}, \qquad (7)$$

где $k_{\text{д}}$ – отношение дисперсии момента двигателя к дисперсии момента сопротивления.

Для крайних значений $\alpha$, $\Omega_0 = 83\ c^{-1}$ построены зависимости $k_{\text{д}} = f(\varepsilon)$ (рис.I). Из рис.I видно, что с увеличением коэффициента демпфирования $\varepsilon$ значение $\nu = \sqrt{k_{\text{д}}}$ снижается и при $\varepsilon \geqslant 0{,}5$ практически не изменяется. Наибольшее снижение $\nu$ происходит до $\varepsilon = 0{,}4$. Указанные кривые не имеют экстремума, и поэтому аналитически они не могут быть исследованы. Однако если в начальных и конечных участках этих кривых провести касательные, то в точке их пересечения значение коэффициента демпфирования двигателя будет наилучшим. В этой области $\varepsilon = 0{,}35 \div 0{,}40$. Значения коэффициента демпфиро-

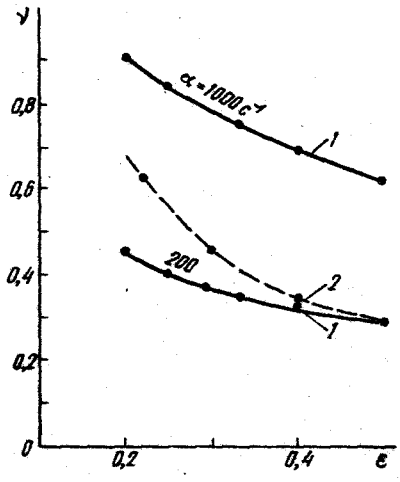



Рис.1. Зависимость коэффициента вариации нагрузки функции демпфирования двигателя
1 – расчетные кривые; 2 – экспериментальная кривая

вания серийно выпускаемых электродвигателей угольных комбайнов значительно ниже (см. табл.I).

Таким образом, существенное снижение дисперсии нагрузки двигателей горных комбайнов, а соответственно, снижение потерь в двигателе и уменьшение его нагрева должны идти по пути повышения коэффициента демпфирования до величины 0,35÷0,40. Это, в свою очередь, требует пересмотра соотношения параметров механической характеристики. Если в выражение для коэффициентов демпфирования подставить значения параметров комбайновых электродвигателей $J$ = I,I; 3,3 кг·м$^2$, $\rho$ = 2 и $\varepsilon$ = 0,4, то получим соотношения:

для $J$ = I,I кг·м$^2$

$$s_к = 0{,}005\sqrt{M_к}; \qquad (8)$$

для $J$ = 3,3 кг·м$^2$

$$s_к = 0{,}003\sqrt{M_к}. \qquad (9)$$

Соотношение (8) для двигателей высотой 400 мм, соотношение (9) – 500 мм. Таким образом, между основными параметрами механической характеристики должна быть строгая зависимость.

Испытания трех электродвигателей на комбайне МК-67 с $\varepsilon$ = 0,22; 0,3; 0,4 и на комбайне ШБМ-2 с $\varepsilon$ = 0,22; 0,36; 0,55 в производственном объединении "Беларускалий" подтвердили полученные результаты.

На рис.I представлена зависимость $\nu = f(\varepsilon)$, где $\nu$ – коэффициент вариации потребляемого тока двигателя комбайна МК-67. Кривая лежит в области, ограниченной кривыми, построенными по выражению (6), и сохраняет их характер.

Зона наилучшего значения коэффициента демпфирования $\varepsilon$ = 0,35÷0,40. В этой зоне суммарные потери в двигателе оказались ниже по сравнению с серийным. На рис.2 представлены экспериментальные и паспортные потери $Q$ и $Q_ф$, фактический КПД $\eta_ф$ и коэффициент формы $k_ф$ в функции коэффициента демпфирования $\varepsilon$.

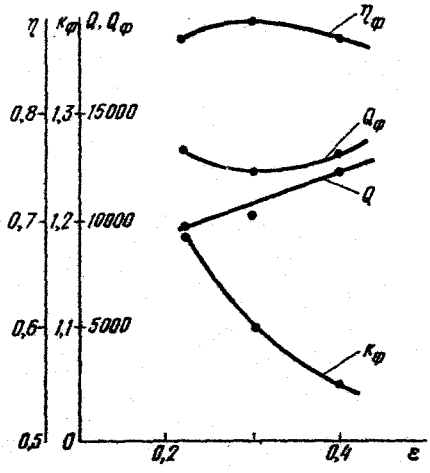



Рис.2. Характеристики потерь в функции демпфирования двигателя

Из рис.2 видно, что в области демпфирования 0,28–0,40 суммарные потери в двигателе меньше, чем у серийного, соответственно выше и КПД. Существенно снизился коэффициент формы графика нагрузки $k_\phi$, что свидетельствует о более равномерной нагрузке, которая, снижая нагрев, уменьшает величину электродинамических усилий на обмотку и, как следствие, повышает наработку двигателей на отказ. По статистическим данным за три года наблюдений наработка на отказ возросла в четыре раза.

## Выводы

1. Проектирование электродвигателей горных комбайнов следует производить с учетом графика нагрузки и коэффициента демпфирования $\varepsilon = 0{,}35 \div 0{,}40$.

2. Повышение коэффициента демпфирования может быть осуществлено увеличением зазора, что повысит общую надежность двигателя, а также выбором материала и конфигурации клетки ротора.

3. Паспортные данные электродвигателя должны устанавливаться при стендовых испытаниях с учетом реального характера нагрузки.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургин З.Я. Аналитические основы динамики выемочных машин. М., Наука, 1966.

2. Корреляционный анализ нагрузок выемочных машин / А.В.Докукин, Ю.Д.Красников, З.А.Хургин и др. М., Наука, 1969.

3. Рудаков В.В., Гринберг Я.П., Соловьев В.С. О динамических параметрах электродвигателей угольных комбайнов. – Известия вузов, Горный журнал, 1975, № 8.

4. Стариков Б.Я., Азарх В.Л., Рабинович З.М. Асинхронный электропривод очистных комбайнов. М., Недра, 1981.

5. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М., Энергия, 1979.