

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ЛИТОЙ МЕДНОЙ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ РОТОРА ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Чуванков В.Ю., Чувашев В.А., к.т.н., Железняков А.В., Папазов Ю.Н., Медведев Ю.Л., Чувашев И.В., Демченко В.Н., Лень А.Т.

Украинский НИИ взрывозащищенного электрооборудования (УкрНИИВЭ)
Украина, 83052, Донецк, ул. 50-ой Гвардейской дивизии, 17, УкрНИИВЭ
тел. (062) 382-93-53; факс (062) 382-93-52

Запропоновано метод визначення електромагнітного моменту вибухозахищеного асинхронного двигуна з литою мідною короткозамкнутою обмоткою ротора при стохастичному навантаженні. Метод дозволяє на стадії проектування вибрати оптимальні параметри двигуна з метою підвищення його перевантажувальної здібності, надійності та енергетичних показників (на прикладі комбайнового двигуна 2ЭКВ 3,5-210).

Предложен метод определения электромагнитного момента взрывозащищенного асинхронного двигателя с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора при стохастическом нагружении. Метод позволяет на стадии проектирования выбрать оптимальные параметры двигателя с целью повышения его перегрузочной способности, надежности и энергетических показателей (на примере комбайнового двигателя 2ЭКВ 3,5-210).

ВВЕДЕНИЕ

В процессе анализа электромагнитного момента взрывозащищенных асинхронных электродвигателей с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора для привода горных машин при стохастическом нагружении выявлены две составляющие:

- средний момент, определяемый по математическому ожиданию;
- случайный момент, определяемый вероятностными характеристиками стохастического момента.

Основой для определения этих двух составляющих служит амплитудно-частотная характеристика двигателя, определяемая аналитически по схемам замещения двигателя и медного стержня в пазу ротора. Параметры схемы замещения определены аналитически по основной и высшим гармоникам (вплоть до 20-й включительно).

Расчет электромагнитного момента, потерь, токов с учетом стохастического характера нагружения позволяет на стадии проектирования двигателя выбрать оптимальные параметры для получения наибольшей перегрузочной способности, надежности и энергетических показателей.

АНАЛИЗ И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Стохастический момент сопротивления $M_c(t)$ на валу взрывозащищенных асинхронных электродвигателей (ВАД) в приводе большинства горных машин относится к классу стационарных эргодических моментов – рис.1. Вероятностными характеристиками случайного $M_c(t)$ в момент времени t_k (t_e) являются:

- математическое ожидание (МО)

$$m_c(t) = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ci}(t_k)}{n}; \quad (1)$$

- дисперсия или средне-квадратическое отклоне-

ние (СКО)

$$D_m(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^n [M_{ci}(t_k) - m_c(t_k)]^2}{n-1}; \quad (2)$$

- корреляционная функция (КФ)

$$K_M(t_k, t_e) = \frac{\sum_{i=1}^n [M_{ci}(t_k) - m_c(t_k)] \cdot [M_{ci}(t_e) - m_c(t_e)]}{n-1}; \quad (3)$$

где n – количество реализаций $M_c(t)$ на интервалах времени t_k , t_e .

$M_c(t)$ привода горных машин реализуется в виде рядов, периодически изменяющихся функций. Для случая, когда $m_c(t) \rightarrow 0$ – рис.1.б)

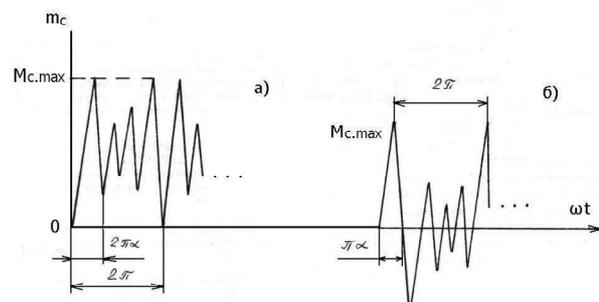


Рис.1. Стационарный эргодический момент сопротивления на валу привода горных машин

$$M_c(t) = \frac{4 \cdot M_{c,max}}{\pi} \left[\sin \frac{\pi\alpha}{2} \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi\alpha}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi\alpha}{2} \cos 5\omega t + \dots \right] \quad (4)$$

Для случая, когда $m_c(t) \neq 0$ – рис.1.а)

$$M_c(t) = M_{c,max} \left[\alpha + \frac{2}{\pi} \sin \pi\alpha \cdot \cos \omega t + \frac{1}{2} \sin 2\pi\alpha \cdot \cos 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\pi\alpha \cdot \cos 3\omega t + \dots \right] \quad (5)$$

Чем больше членов ряда в (4), (5), тем адекватнее представление $M_c(t)$ к реальным графикам стохастической нагрузки, что обусловлено возможностями вычислительной техники. С достаточной для практики точностью в приводе горных машин ограничиваются 11...13 гармониками.

Для приводных двигателей, в частности, добычных комбайнов, при таком представлении $M_c(t)$ корреляционная функция имеет вид [1]:

$$K_M(t_k, t_e) = e^{-\beta|t_k - t_e|} \cdot \cos \beta \tau, \quad (6)$$

или $K_M(t_k, t_e) = e^{-\beta|t_k - t_e|} \cdot (b \cdot \cos \beta \tau + c \cdot \sin \beta \tau)$, (7) где α – параметр КФ. Чем больше α , тем более беспорядочный характер носит реализация $M_c(t)$;

$$[\tau] = |t_1 - t_2|;$$

α, β, b, c – коэффициенты КФ. Определяются по методу наименьших квадратов [2].

Стремление КФ к нулю при $\tau \rightarrow \infty$ говорит в пользу эргодичности $M_c(t)$.

Стохастический момент привода горных машин имеет нормальный закон распределения, одномерная плотность вероятностей которого [3]

$$f(\xi) = \frac{1}{y_0 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \left(\frac{\xi - \langle \xi \rangle}{y_0} \right)^2}, \quad (8)$$

где ξ – случайная функция – $M_c(t)$; y_0 – дисперсия случайной функции; $\langle \xi \rangle$ – математическое ожидание случайной функции.

При небольшом времени непрерывной работы $t_p = 2...5$ мин, а также при пуске ВАД $M_c(t)$ относят к классу нестационарной случайной функции.

Степень загруженности ВАД переменной составляющей $M_c(t)$ характеризуется коэффициентом вариации:

$$v = \frac{y_0}{\langle \xi \rangle}. \quad (9)$$

В большинстве случаев для ВАД привода горных машин $v = 0,1...0,15$.

Стохастический характер графика нагрузки $M_c(t)$ приводит к тому, что установившийся продолжительный режим работы ВАД сопровождается непрерывным переходными процессами, когда потребляемый ток и электромагнитный момент не постоянны, а изменяются по определенному закону.

$M_c(t)$ имеет две составляющие: среднее значение, равное математическому ожиданию $\langle M_c(t) \rangle$, и изменение относительно среднего значения $\Delta M_c(t)$, характеризующееся вероятностными параметрами $M_c(t)$ и несущее всю информацию о случайном характере $M_c(t)$.

Для определения токов и электромагнитного момента ВАД можно представить в виде структурной схемы – рис.2, состоящей из совокупности двух стационарных линейных одномерных динамических систем $\Phi_1(j\omega)$ и $\Phi_2(j\omega)$, и статического звена, реали-

зующего установившееся значение токов и скольжение ВАД при действии на него $\langle M_c(t) \rangle$.

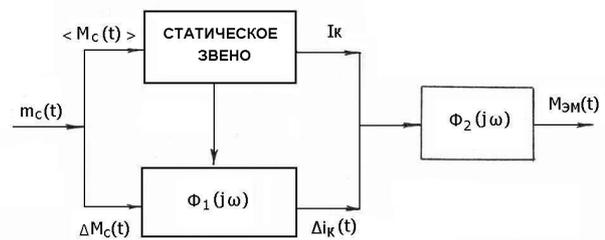


Рис. 2. Структурная схема ВАД с учетом случайного характера нагрузки

Динамическая система $\Phi_1(j\omega)$ реализует реакцию электрохимической системы ВАД на возмущающее воздействие $\Delta M_c(t)$, представленного в виде гармонической функции

$$\Delta M_c(t) = M_{c,\max} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (10)$$

где φ_0 – начальная фаза гармонической функции $\Delta M_c(t)$, определяемая по уравнениям (4), (5).

Известно [3], что реакцией линейной стационарной системы на гармонический сигнал является сигнал того же вида, что и входной, но отличающийся от последнего по амплитуде и фазе. Тогда приращение тока

$$\Delta i_k(t) = I_{k,\max} \cdot L_{ik} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{ik}), \quad (11)$$

где $I_{k,\max}$ – амплитудное значение тока; L_{ik} – амплитудно-частотная характеристика динамического звена $\Phi_1(j\omega)$; ($AЧХ$); φ_{ik} – фазо-частотная характеристика динамического звена $\Phi_1(j\omega)$, ($FЧХ$).

Для определения АЧХ и ФЧХ ВАД с литой медной короткозамкнутой обмоткой (ЛМКО) ротора используется схема замещения – рис.3, учитывающая насыщение магнитной цепи и вытеснение тока в стержнях обмотки ротора в зависимости от скольжения S .

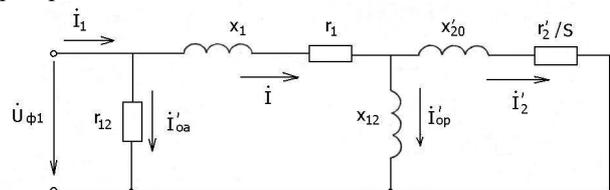


Рис.3. Схема замещения электродвигателя

В этой схеме замещения при номинальном скольжении S_n : $U_{\phi 1}$ – фазное напряжение обмотки статора; I_{\checkmark} – номинальный ток электродвигателя; I'_{oa} – активная составляющая тока холостого хода; I'_{op} – реактивная составляющая тока холостого хода; I'_2 – ток в ветви схемы замещения роторной цепи (ориентировочно равен приведенному току в стержне I'_c); r_{12} – активное сопротивление цепи намагничивания; x_{12} – индуктивное сопротивление цепи намагничивания; r_1 – активное сопротивление фазы статора; x_1 – индуктивное сопротивление фазы статора; x'_{20} – индуктив-

ное сопротивление фазы ротора (приведенное); r_2' – активное сопротивление фазы ротора (приведенное).

Известно, что частотная характеристика передаточной функции представляет собой отношение частотного спектра выходной функции к частотному спектру входной. Для ВАД с ЛМКО ротора частотная характеристика динамического звена $\Phi_1(j\omega)$

$$\Phi_1(j\omega) = \frac{1}{Z} = Y(j\omega), \quad (12)$$

где Z – комплексное сопротивление динамического звена; Y – комплексная проводимость.

Для электродвигателя, представленного схемой замещения рис.3:

$$Z = \frac{r_{12} \cdot (Z_1 + \frac{jx_2 \cdot Z_2}{jx_{12} + Z_2})}{r_{12} + Z_1 + \frac{jx_2 \cdot Z_2}{jx_{12} + Z_2}}, \quad (13)$$

где $Z_1 = r_1 + jx_1$
 $Z_2 = r_2' / S + jx_2'$ } комплексные сопротивления ветвей.

Тогда:

$$Y = \frac{r_{12} + Z_1 + \frac{jx_2 \cdot Z_2}{jx_{12} + Z_2}}{r_{12} \cdot (Z_1 + \frac{jx_2 \cdot Z_2}{jx_{12} + Z_2})} = \frac{1}{Z} \cdot e^{-j \cdot \text{arctg} \varphi}. \quad (14)$$

В (14) $\frac{1}{Z}$ представляет собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), а $\text{arctg} \varphi$ – фазо-частотную характеристику ВАД.

Определение частотных характеристик динамического звена $\Phi_1(j\omega)$ выполнено на примере ВАД типа 2ЭКВ3,5-210 с ЛМКО ротора для привода добожного комбайна.

В соответствии со схемой замещения комплексное сопротивление динамического звена $\Phi_1(j\omega)$ зависит не только от порядка гармоники, определяемой частотой ω (угловой скоростью вращения поля гармоники), но также и от скольжения ротора S , также зависящим от порядка гармоники и дисперсии (СКО) $\Delta M_c(t)$. С учетом изложенного комплексное сопротивление двигателя 2ЭКВ3,5-210 с ЛМКО ротора при $S = S_n$ по основной гармонике:

$$Z = 0,394 \cdot e^{j65^\circ};$$

Комплексная проводимость:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{0,394 \cdot e^{j65^\circ}} = 2,538 \cdot e^{-j65^\circ}$$

$$Z = \begin{bmatrix} r_1 + (j\omega + j\omega_k)L_1 & L_m(j\omega + j\omega_k) & L_m(j\omega + j\omega_p) \\ L_m[j\omega + j(\omega_k - \omega_p)] & r_2 + [j\omega + j(\omega_k - \omega_p)]L_2 & L_m[j\omega + j(\omega_k - \omega_p)] \\ L_m[j\omega + j(\omega_k - \omega_p)] & L_m[j\omega + j(\omega_k - \omega_p)] & L_m[j\omega + j(\omega_k - \omega_p)] \\ \dots & \dots & \dots \\ L_m[j\omega + j(\omega_k - \omega_p)] & L_m[j\omega + j(\omega_k - \omega_p)] & r_n + [j\omega + j(\omega_k - \omega_p)]L_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

Таким образом, при номинальном скольжении $S_n = 0,03$ АЧХ и ФЧХ двигателя 2ЭКВ3,5-210 с ЛМКО ротора по основной гармонике ($\omega = 314$ 1/с):

$$y(\omega) = 2,538; \quad \varphi(\omega) = -65^\circ.$$

При других скольжениях в пределах дисперсии $\Delta M_c(t)$ значения $y(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ приведены в табл.1.

Таблица 1
Значения частотных характеристик ВАД типа 2ЭКВ3,5-210 по основной гармонике

$S \cdot 10^{-1}$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$y(\omega)$	4,7	3,8	3,1	2,538	2,14	1,63
$\varphi(\omega)$	-51°	-59°	-62°	-65°	-68°	-71°

От действия основной гармоники учет увеличения омического сопротивления стержня ротора осуществляется с помощью коэффициента

$$K_r = h_c' \cdot \frac{\text{sh}(2h_c') + \sin(2h_c')}{\text{ch}(2h_c') - \cos(2h_c')}, \quad (15)$$

где h_c' – приведенная высота стержня ротора для учета вытеснения.

С целью учета вытеснения тока в стержне ротора от действия высших гармоник схема замещения роторной цепи представлена в виде многоконтурной системы с постоянными параметрами – рис. 4. Разбиение стержня ротора на изолированные друг от друга бесконечно тонкой изоляцией элементарные слои приводит к повышению порядка системы дифференциальных уравнений ВАД, однако, как показано в [4] можно ограничиться 2-4 контурами роторной цепи для достижения приемлемой для расчетов точности.

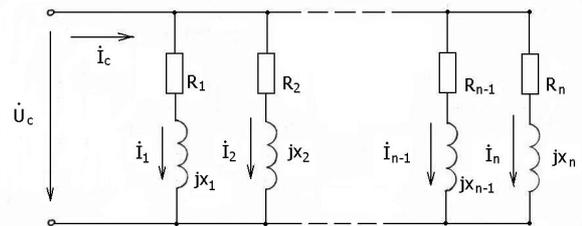


Рис.4. Схема замещения медного стержня в пазу ротора ВАД

Для определения параметров динамического звена $\Phi_1(j\omega)$ от действия высших гармоник $M_c(t)$ используется прямоугольная система координат $U-V$, вращающаяся со скоростью поля в установившемся режиме ω_k .

С учетом изложенного комплексное сопротивление

где r_i, L_i – параметры контуров; $i = 1, 2, \dots, n$; ω_p – угловая скорость вращения ротора; L_m – взаимная индуктивность контуров.

Система уравнений (16) представляет собой матрицу в абсолютных значениях параметров, что пред-

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} r_1 + pL_1 & -L_1 & pL_m & \dots & -L_m & 0 \\ L_1 & r_1 + pL_1 & L_m & & pL_m & 0 \\ pL_m & -L_m \cdot S & r_2 + pL_2 & & -L_m \cdot S & i_{2v} \cdot L_2 + L_m \sum_1^n i_{kv} \\ \dots & & & & & \\ L_m \cdot S & pL_m & L_m \cdot S & & r_n + pL_n & -(i_{nu} \cdot L_n + L_m \sum_1^n i_{ku}) \\ D \sum_2^n i_{kv} & -D \sum_2^n i_{ku} & -D \cdot i_{1v} & & D \cdot i_{1u} & \frac{j}{P_n} P \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где p – оператор дифференцирования по времени t ; $D = 1,5 \cdot P_n L_m$; P_n – число пар полюсов ВАД; S – скольжение ротора; J – суммарный момент инерции ротора и сочлененных с ним механизмов; $i_{ku}, i_{kv} \dots i_{nu}, i_{nv}$ – токи соответствующих контуров по осям $U - V$.

Матрица (17) дополнена элементами уравнения движения ротора J, ω_p, P_n, S , влияющих на параметр \underline{Z} при воздействии высших гармоник.

Тогда частотная характеристика динамического звена

$$\Phi_1(j\omega) = \frac{\Delta_{km}(j\omega)}{\Delta(j\omega)}, \quad (18)$$

где Δ – определитель системы, получаемый из (17) посредством замены p на $j\omega$; Δ_{km} – алгебраическое

$$\underline{Z}' = \begin{bmatrix} r_1 + pL_{10} & -\omega_\kappa L_{1t} & pM_o & \dots & -\omega_\kappa M_t & 0 \\ \omega_\kappa L_{10} & r_1 + pL_{1t} & \omega_\kappa M_o & & pM_t & 0 \\ pM_o & -M_t \cdot (\omega_\kappa - \omega_p) & r_2 + pL_{20} & & -M_t \cdot (\omega_\kappa - \omega_p) & i_{2v} \cdot L_{20} + M_o \sum_1^n i_{kv} \\ \dots & & & & & \\ M_o \cdot (\omega_\kappa - \omega_p) & pM_t & M_o \cdot (\omega_\kappa - \omega_p) & & r_n + pL_{nt} & -(i_{nu} \cdot L_{n0} + M_o \sum_1^n i_{ku}) \\ D_o \sum_2^n i_{kv} & -D_t \sum_2^n i_{ku} & -D_o \cdot i_{1v} & & D_t \cdot i_{1u} & \frac{j}{P_n} P \end{bmatrix} \quad (19)$$

где $D_o = 1,5 \cdot P_n \cdot M_o$; $D_t = 1,5 \cdot P_n \cdot M_t$; $L_{\kappa o}, L_{\kappa t}$ – статическая и динамическая индуктивности контуров статора и ротора. Определяется из графика зависимости потокосцепления от тока по хорде и касательной к рабочей точке.

Частотная характеристика динамического звена $\Phi_2(j\omega)$ определяется аналогично (18). На рис. 5 и 6 приведены частотные характеристики ВАД с ЛМКО ротора типа 2ЭКВ3,5-210, рассчитанные для основной ($f=50$ Гц) и высших гармоник до двадцатой включительно ($f=1000$ Гц).

В соответствии с [5] электрические потери в контурах стержня ротора

ставяет определенные неудобства при расчетах. Поэтому, запишем эту матрицу в относительных единицах в операторной форме

дополнение этого определителя, соответствующее элементу, стоящему на пересечении k -ой строки и m -го столбца.

По (18) определяется АЧХ и ФЧХ системы и по (11) – приращение тока. Таким образом, входные величины I_k и $\Delta i_k(t)$ известны.

Для расчета электромагнитного момента ВАД $M_{эм}(t)$ при стохастическом нагружении используется динамическое звено $\Phi_2(j\omega)$, которое учитывает, помимо вытеснения тока в стержнях, насыщение магнитопровода посредством введения в него статической M_c и динамической M_t взаимных индуктивностей. С учетом этого матрица комплексного сопротивления приобретает вид:

$$P_{эл}(t) = \frac{3}{2} \sum_{k=1}^n r_k (i_k^2 + \frac{1}{2} I_{k,max}^2 \cdot \lambda_k^2) + 3I_{k,max} \sum_{m=u,v} \sum_{k=1}^n r_k [i_{km} \cdot \lambda_{km} \cdot \cos(\omega t + \varphi_o + \varphi_{km})] + \frac{3}{4} I_{k,max}^2 \sum_{m=u,v} \sum_{k=1}^n r_k [\lambda_k^2 \cdot \cos 2(\omega t + \varphi_o + \varphi_{km})], \quad (20)$$

где $i_k^2 = i_{ku}^2 + i_{kv}^2$ – квадрат пространственного вектора тока k -го контура; $\lambda_k^2 = \lambda_{ku}^2 + \lambda_{kv}^2$ – квадрат результирующего модуля АЧХ для k -го контура; r_k – активное сопротивление k -го контура; φ_{km} – фазовый угол тока в соответствии с ФЧХ для k -го контура.

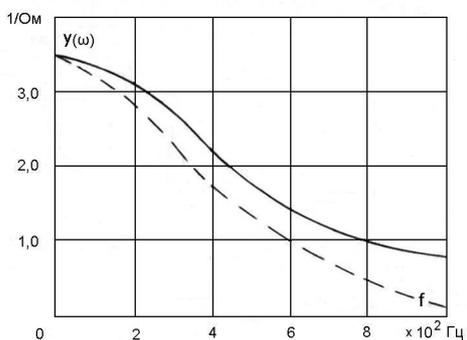


Рис.5. Амплитудно-частотная характеристика электродвигателя 2ЭКВ3,5-210
 — с учетом насыщения
 - - - без учета насыщения

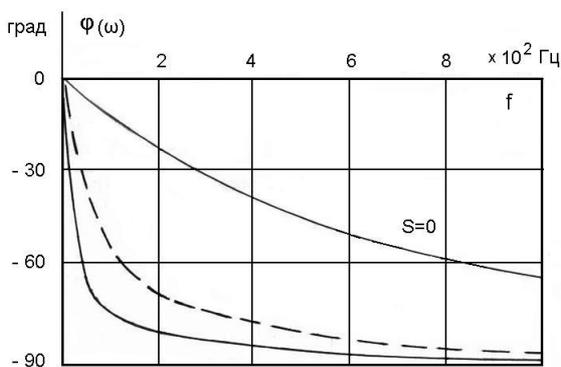


Рис. 6. Фазо-частотная характеристика электродвигателя 2ЭКВ3,5-210
 — с учетом насыщения
 - - - без учета насыщения

Электромагнитный момент ВАД с ЛМКО ротора при стохастическом нагружении $M_c(t)$:

$$M_{\vartheta}(t) = M_n + 1,5pL_m I_{k,\max} \cdot \sum_{m,e=u,v} \sum_{k=2}^n (-1)^j \times \\ \times [i_{1m} \cdot \lambda_{ke} \cdot \cos(\omega t + \varphi_o + \varphi_{ke}) + \\ + i_{ke} \cdot \lambda_{1m} \cdot \cos(\omega t + \varphi_o + \varphi_{1m})], \quad (21)$$

$$\text{где } j = \begin{cases} 1 & \text{при } m=u \\ 2 & \text{при } m=v \end{cases}$$

M_n – электромагнитный момент для средних значений токов контуров, когда $M_c(t) = m_c(t)$.

$$M_n = 1,5pL_m \cdot (i_{1v} \sum_2^n i_{ku} - i_{1u} \sum_2^n i_{kv}).$$

ВЫВОДЫ

1. Электромагнитный момент ВАД с ЛМКО ротора при стохастическом нагружении, когда $M_c(t)$ носит случайный характер, имеет две составляющие: средний M_n , как в случае детерминированной нагрузки, определяемый по математическому ожиданию $\langle M_c(t) \rangle$, и случайный $M_{\vartheta}(t, \omega, \lambda, \varphi)$, определяемый вероятностными характеристиками $M_c(t)$.

2. Из выражений для вероятностных характеристик электромагнитного момента ВАД следует, что в

продолжительном режиме работы при стохастическом нагружении величина M_n может быть определена по постоянному значению нагрузочного момента, равному $\langle M_c(t) \rangle$. Диапазон изменения M_{ϑ} , оцениваемый посредством дисперсии $\sigma_{M_{\vartheta}}$, изменяется линейно в зависимости от диапазона изменения случайного момента нагрузки и существенно зависит от параметров двигателя, в частности от главного индуктивного сопротивления X_{l2} .

3. Рассмотренный метод определения электромагнитного момента при стохастическом нагружении позволяет на стадии проектирования ВАД с ЛМКО ротора выбрать наиболее благоприятное сочетание параметров двигателя с целью повышения его перегрузочной способности, надежности и энергетических показателей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургин З.Я. Статистическая динамика горных машин.- М.: Машиностроение, 1978.- 239 с.
- [2] Гайдукевич В.И., Титов В.С. Случайные нагрузки силовых электроприводов.- М.: Энергоатомиздат, 1983.-160 с.
- [3] Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургин З.Я., Шмарьян Е.М. Корреляционный анализ нагрузок выемочных машин.- М.: Наука, 1969.-136 с.
- [4] Максимкин В.Л. Асинхронный электродвигатель со стохастической нагрузкой.- В кн.: Межвуз. Сб.тр. № 73, М.: МЗИ, 1985.-с.19-27.
- [5] Максимкин В.Л. Разработка и применение математических моделей асинхронных двигателей с учетом случайного характера нагрузки.- Автореферат на соискание учен. степ. канд. техн. наук, М.: МЭИ-1986 г.

Поступила 23.09.2003