

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Т. М. НЭМИНИ, А. М. ПАИТЕЛЕЕВ, Р. Е. АКОПЯН

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При серийном производстве и в эксплуатации асинхронных двигателей достаточно часто выявляются случаи нарушения симметрии короткозамкнутой обмотки, обусловленные, в основном, дефектами в стержнях при заливке алюминия под давлением. Асимметрия к.з. обмотки ротора ухудшает механические характеристики двигателя, и связи с чем анализу этого явления уделяется большое внимание [1—2]. Наиболее полно и обстоятельно этот анализ проведен в [1], но применительно к частным случаям обрывов стержней, когда сохраняется симметрия контуров относительно места обрыва.

В настоящей работе решение указанной задачи выполнено в строгой постановке, исходя из системы уравнений Горева-Парка, при общепринятых краевых и граничных условиях. В результате решения этой задачи получены следующие выражения для токов статора и моментов (прямой и обратной последовательностей) асинхронного двигателя:

$$i_1^* = \frac{\dot{U}_1}{jx_a + r_1 + x_M \dot{\gamma}_1 - \frac{x_M \dot{\gamma}_2^* \dot{\gamma}_2}{1 - 2S}}; \quad (1)$$

$$i_2^* = \frac{-x_M \dot{\gamma}_2^*}{jx_a + x_M \dot{\gamma}_1 - \frac{r_1}{1 - 2S}} \cdot i_1^*; \quad (2)$$

$$M_1 = \frac{3p}{\omega_1} I_1^2 \operatorname{Re} \left(x_M \dot{\gamma}_1 - \frac{x_M \dot{\gamma}_2^* \dot{\gamma}_2}{jx_a + x_M \dot{\gamma}_1 - \frac{r_1}{1 - 2S}} \right); \quad (3)$$

$$M_2 = \frac{3p}{\omega_1} \cdot \frac{r_2}{2S - 1}. \quad (4)$$

Эти формулы дают возможность исследовать и оценивать влияние асимметрии короткозамкнутой клетки на ток и момент асинхронного двигателя при помощи четырех коэффициентов асимметрии ротора:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \sum_{k=1}^{m_2} \frac{j_k^{(1)} I^{j\gamma_k}}{m_2} q_k; & \gamma_1^* &= \sum_{k=1}^{m_2} \frac{j_k^{(2)} I^{-j\gamma_k}}{m_2} q_k; \\ \gamma_2 &= \sum_{k=1}^{m_2} \frac{j_k^{(2)} I^{j\gamma_k}}{m_2} q_k; & \gamma_2^* &= \sum_{k=2}^{m_2} \frac{j_k^{(1)} I^{-j\gamma_k}}{m_2} q_k. \end{aligned} \quad (5)$$

При полной симметрии ротора:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= 1; & \gamma_1^* &= \gamma_2^* = \gamma_2 = 0; & i_2 &= 0; & i_1 &= \frac{U_1}{jx_a + r_1 + x_m}; \\ M_2 &= 0; & M_1 &= \frac{3P}{\omega_j} I_1^2 x_m. \end{aligned} \quad (6)$$

Величины, входящие в (1) — (6) для определения токов, моментов и коэффициентов асимметрии, следующие:

$$x_m = \frac{Sx_m^2}{z_2};$$

I_1 и I_2 — модули токов i_1 и i_2 ; S — скольжение; x_m — индуктивное сопротивление взаимной индукции; U_1 — напряжение статора;

$$x_a = x_m + x_1;$$

x_1 и r_1 — индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление статорной обмотки; q_k — отношение максимальных взаимноиндуктивностей фазы обмотки статора поврежденного контура к такой же неповрежденного; i_1^* , i_2^* — комплексные значения токов статора прямой и обратной последовательностей; $z_2 = jS(x_m + x_2) + r_2$ — полное сопротивление вторичной цепи короткозамкнутой обмотки асинхронного двигателя, приведенное к статору; x_2 , r_2 — индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление роторной обмотки; m_1 , m_2 — число контуров неповрежденного и поврежденного роторов соответственно (два соседних стержня образуют один контур); γ_k — угол между осью k -го контура и осью начала отсчета; $J_k^{(1)}$, $J_k^{(2)}$ — токи прямой и обратной последовательностей, наведенные в контурах k . з. обмотки ротора.

Для определения коэффициентов асимметрии необходимо сначала решить систему уравнений для токов $J_k^{(1)}$ и $J_k^{(2)}$ (рис. 1):

$$\begin{cases} -\frac{j^{(1)}}{m_2} + j^{(1)}d - j^{(1)}_1 = q_0 Z_y; \\ -j^{(1)}_{k-1} + j^{(1)}_k d - j^{(1)}_{k+1} = Z_y l - j \frac{(2k+m)\pi}{m_2}; \\ -\frac{j^{(1)}}{m_{2-1}} + \frac{j^{(1)}}{m_2} d - j^{(1)}_0 = Z_y l' - j \frac{(2k+m)\pi}{m_2}, \end{cases} \quad (7)$$

где $m'_1, 0, 1, m'_2-1, k$ — номера контуров и соответствующих им контурных токов по рис. 1, $k = 1, 2, 3, \dots, m-1$.

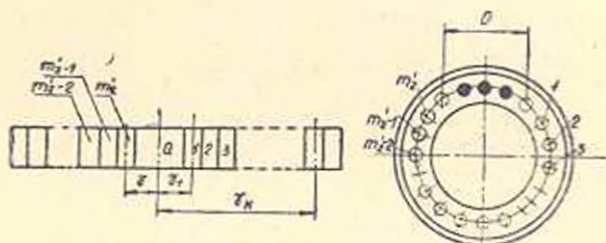


Рис. 1. Схема нумерации контуров короткозамкнутой обмотки ротора при обрыве одного или нескольких соседних стержней. Оборванные стержни зачернены.

Для токов $J^{(2)}$ имеет место система уравнений, аналогичная (7), но с той разницей, что показатель при экспоненте в правой части меняет знак.

В (7) приняты обозначения:

$$q_k = \frac{\sin \frac{m+1}{2} \gamma}{\sin \frac{\gamma}{2}}; \quad \gamma = \frac{2\pi p}{m_2}; \quad L_y = d - 2\cos \gamma;$$

p — число пар полюсов асинхронного двигателя; d — отношение комплексного сопротивления неповрежденного контура к комплексному сопротивлению стержня; a — то же для поврежденного контура; m — число оборванных стержней.

Рассмотрим случай симметричного обрыва одного или нескольких соседних стержней (рис. 1). Удобно решение этой системы искать в виде суммы

$$J_k = J_{ky} + I_k, \quad (8)$$

где I_k — некоторый добавок. В качестве J_{ky} примем:

$$J_{ky} = I e^{-j \frac{(2k+m)\pi}{m_2}}; \quad J_{0y} = \frac{q_0 Z_y}{2a \cos \gamma}, \quad (k_1 = 1, 2, 3, \dots, m'_2). \quad (9)$$



С учетом (8) и (9) получим систему для добавочных токов:

$$\begin{cases} -I_{m_2} + I_0 a - I_1 = E_0; \\ I_0 + I_1 d - I_2 = E_1; \\ -I_{k-1} + I_k d - I_{k+1} = 0; \\ -I_{m_1-1} + I_{m_2} d - I_0 = E_{m_2}. \end{cases} \quad (10)$$

Выделим из нее однородную систему

$$-I_{k-1} + I_k d - I_{k+1} = 0 \quad (k = 2, 3, 4, \dots, m_2 - 1), \quad (11)$$

решение которой удобно получить в виде

$$I_2 = A I_{m_2} + B I_1; \quad I_{m_1-1} = A I_1 + B I_{m_2}, \quad (12)$$

где

$$B = \frac{1}{d - \frac{1}{d - \frac{1}{d - \frac{1}{d - \frac{1}{d + \dots}}}}};$$

$$A' = \frac{1}{d \left(d - \frac{1}{d} \right) \left(d - \frac{1}{d - \frac{1}{d}} \right) \dots \left(d - \frac{1}{d - \frac{1}{d - \frac{1}{d + \dots}}} \right)},$$

причем, цепные дроби в A' и B легко вычисляются и быстро сходятся. Подставив (12) в оставшиеся уравнения системы (10), найдем «граничные» токи I_0 , I_1 и I_{m_2} .

Для окончательного определения остальных токов воспользуемся разностным представлением решения однородной системы (11) $I_k = c_1 \lambda_1^k + c_2 \lambda_2^k$ при граничных условиях

$$c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2 = I_1; \quad c_1 \lambda_1^{m_2} + c_2 \lambda_2^{m_2} = I_{m_2}. \quad (13)$$

Используя решение этой системы (13) и подставляя полученные выражения для токов в вышеприведенные формулы для коэффициентов асимметрии, после преобразований получаем

$$\begin{aligned} \gamma_1' = \frac{1}{m_2} \left\{ m_2 - (m+1) + L^{\frac{1}{2}(2+m)} \left(I_{m_2} \frac{\lambda_1 L^{m_2}}{\lambda_1 L^{m_2} - 1} - I_1 \frac{1}{\lambda_1 L^{m_2} - 1} \right) + \right. \\ \left. + q_0^2 \frac{d - 2 \cos \gamma}{a - 2 \cos \gamma} + q_0 I_0 \right\}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_2 = & \left\{ \left(I_{m_2} \frac{\lambda_2 l^{-j m_2}}{\lambda_2 l^{-j} - 1} - I_1 \frac{1}{\lambda_2 l^{-j} - 1} \right) e^{-j \frac{\gamma}{2} (2+m)} + \right. \\ & \left. + q_0^2 \frac{d - 2 \cos \gamma}{d - 2 \cos \gamma} + q_0 l_0 - \frac{\sin (m+1) \gamma}{\sin \gamma} \right\} \frac{1}{m_2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для серийно выпускаемых маломощных асинхронных двигателей с к.з. ротором мощностью $\sim 1-2$ кВт при обрыве от одного до 40% стержней ротора величины модуля $\dot{\gamma}_1$ лежат в пределах $1-0,6$, а модуля $\dot{\gamma}_2$ — в пределах $0-0,4$.

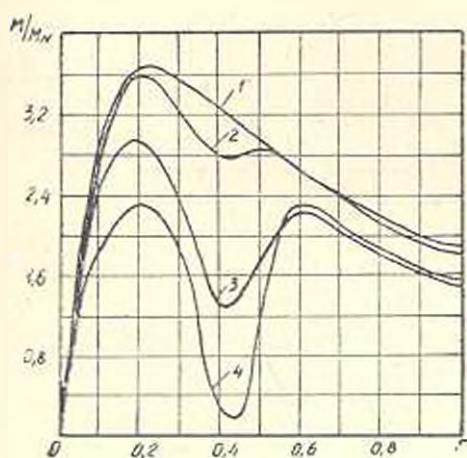


Рис. 2 Кривые моментов асинхронного двигателя 4А80А2 с асимметричным и неповрежденным короткозамкнутым ротором. 1 — неповрежденный ротор, 2 — обрыв одной стержень из 20, 3 — обрываны 3 стержня (подряд) из 20, 4 — обрываны 5 стержней (подряд) из 20.

Таким образом, получены простые аналитические выражения для коэффициентов асимметрии при учете электрической связи между контурами ротора. Анализ этих выражений показывает, что учет электрической связи при малых скольжениях, т. е. в рабочей зоне двигателя может привести к существенной погрешности.

Приведенная выше методика расчета токов и моментов асинхронного двигателя с асимметричной короткозамкнутой обмоткой ротора была апробирована на серийном двигателе типа 4А80А2, $P_N = 1,5$ кВт с $p = 1$ при обрыве одного, трех (подряд) и пяти (подряд) стержней из общего количества 20 стержней. Результаты расчетов приведены в виде характеристик $M/M_N = f(s)$ на рис. 2.

Анализ для случаев обрыва одного или нескольких соседних стержней в двух или нескольких разных местах клетки (рис. 3) проводится аналогично, с помощью изложенного метода. Применение целых дробей при решении однородных уравнений для добавочных токов в контурах $[1 - (N-1)]$ и $[(N+1) - m_2 - 1]$ показывает, что добавочные токи можно определить приближенно по принципу наложения, т. е.

независимо от места другого повреждения, при условии, что количество неповрежденных контуров, разделяющих поврежденные участки, не менее (2—3) для больших скользящих и (5—6) — для малых. Выражения для коэффициентов асимметрии в этих случаях аналогичны (14). Таким же образом можно исследовать случаи обрыва одного или нескольких соседних участков короткозамкнутого кольца в одном или нескольких местах короткозамкнутого ротора, и также случаи увеличения сопротивления одного или нескольких соседних стержней из-за неполной заливки алюминия в одном или нескольких местах клетки. Полученные выражения позволяют аналитически оценить влияние количества и места расположения групп оборванных стержней на ток и момент асинхронного двигателя.

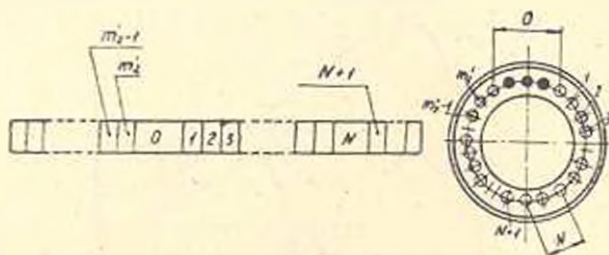


Рис. 3. Схема нумерации контуров короткозамкнутой обмотки ротора при обрыве одного или нескольких соседних стержней в двух разных местах. Обозначения аналогичны рис. 1.

ЕрПИ им. К. Маркса

25. XI. 1984

Պ. Մ. ԿԵՄԵՆԻ, Ա. Մ. ՊԱՆՏՆԵՍՅԱՆ, Բ. Ե. ՀԱՊՈՐՅԱՆ

ԱՍԻՆԽՐՈՆ ԶԱՐԺԻՉԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՎԵՐԱ
ԿԱՐԸ ՓԱԿՎԱԾ ԽՈՏՈՐԻ ԱՆՀԱՄԱՁԱՓՈՒԹՅԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒՄԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Բերվում են կարճ փակված ռոտորի փաթույթի էլեկտրական անհամաչափության ժամանակ ասինխրոն շարժիչի աշխատանքի վերլուծական հետազոտման արդյունքները (մեկ կամ մի քանի ձողերի կտրում), Դուրս են բերված բանաձևեր անհամաչափության պայմաններում ուղիղ և հակառակ հաղորդականության հոսանքների և մոմենտների որոշման համար:

Հոդվածում տրված մեթոդով կատարված է մոմենտների հաշվարկի օրինակ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Жакеничус С. Г. И., Исследование асинхронного электродвигателя с асимметрией в беличьей клетке ротора: Автореф. Дис. канд. техн. наук. — Вильнюс, 1969. — 23 с.
2. Богуславский И. З. Токи в несимметричной короткозамкнутой клетке ротора. Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1982, № 1, с. 71—76.