

IMPACT OF THE AIR GAP ECCENTRICITY ON THE LEAKAGE FLUX CHANGE OUTSIDE THE IM FRAME DURING RUN-OUT OF THE MOTOR AFTER DISCONNECTION FROM THE SUPPLY

G.G. Rogozin

National Technical University of Donetsk

Department of Electrical Engineering

58, Artem Str., 83000 Donetsk, Ukraine

phone: +38(0622)910307 – fax: +38(0622)921278 – e-mail: rgg@elf.dgtu.donetsk.ua

Перевод: Хворостяненко М.А.

Воздействие неравномерности воздушного зазора на изменение потока рассеяния вне корпуса во время выбега двигателя.

Реферат

Статья посвящена анализу влияния неравномерности воздушного зазора на электромагнитные параметры и переходные процессы в фазном роторе 40 кВ асинхронном двигателе после отключения от электрической сети. Делается заключение, что изменение в магнитной индукции вне корпуса АД используется для определения неравномерности воздушного зазора.

1. Введение

Проблемы сбережения электрической энергии и надежности АД имеют первостепенную важность. Обе эти проблемы проявляют себя при неравномерности воздушного зазора. Упомянутое явление – следствие постепенного увеличения износа подшипников, деформации торцевых щитов и т.д.

Данные причины обуславливают увеличение вибрации двигателя и ускоряют износ подшипников, и т.д. В некоторых случаях весьма возможно, что ротор коснется внутренней поверхности статора. Такое повреждение приводит к необходимому длительному ремонту для восстановления АД. В результате изменения эксцентриситета, как известно, КПД может уменьшаться на 2.8 %, максимальный и пусковой вращающий моменты ротора уменьшаются на 20 и 8% соответственно, скольжение может увеличиться на 10%. Заметное влияние на указанные выше параметры режимов, когда неравномерность увеличивается более чем на 30-35 процентов.

Достаточно точный, но требуемый трудовых затрат метод для исследования неравномерности воздушного зазора в АД основывалась на использовании постоянного тока. Современная диалоговая диагностика, как правило, является основанной на измерении и обработке фазовых токов статора и подводимого напряжения. Указанные выше данные – являются

вторичными параметрами режима измерительных трансформаторов. Между тем, основная часть АД, с точки зрения общего количества потребляемой активной мощности, принадлежит к уровню низкого напряжения цепи, и не оборудованы трансформаторами. При этих условиях новый подход использования, как диагностический параметр, потока рассеяния, появляющегося вне корпуса АД во время затухания периодического броска тока в клетке ротора, после выключения АД от электрической сети в течение времени (не более 3 секунд), представляет особый интерес. Применение изложенного подхода, который использует сигнал импульса переключенного тока якоря АД при нормальном переходном процессе, имеет преимущества, по отношению к обычным методам, в частности это предполагает перспективы проектирования специализированных переносных устройств для контроля неравномерности воздушного зазора.

2. Анализ неравномерности воздушного зазора на параметры эквивалентной схемы АД.

Магнитный поток АД отсоединенного от системы питания включает воздушные области связанные с зазорами ротора, роторный и подшипниковый, дифференциальный и зубцовый потоки рассеяния обозначаются соответственно λ_{s2} , λ_{e2} , λ_{d2} и λ_{t2} соответственно.

Используя геометрические измерения и математическую модель АД, основанную на изложенных уравнениях, магнитная проводимость для сцепленного потока рассеяния в данной неравномерности воздушного зазора рассчитывается.

С отключением обмотки статора от источника питания изменения в зубцовых и дифференциальных магнитных проводимостях представляют главный интерес для поставленной задачи. Изменения в упомянутой магнитной проводимости, как функции зависящей от неравномерности анализируются дальше в подробностях. Рассмотрение ведется с принятием во внимание выпуклости статора и сердечника ротора.

Результатов инженерного моделирования общих электромагнитных величин АД достаточно для создания следующих универсальных упрощенных выводов:

- ферромагнитные сердечники имеют бесконечно большую магнитную проводимость в сравнении с вакуумом;
- возможность использования принципа наложения для трактовки магнитного поля двигателя, как сумму полей созданных каждой обмоткой и отдельными составляющими;
- уменьшать все фазовые токи статора до нуля, при отключении АД от питающей цепи, быстро, то есть в течение промежутка времени пока существует дуга между контактами разрывающими цепь статора;

Упомянутые выше заключения для АД МА36-41/8Ф (40 кВ, 380/660. В, 730) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Электромагнитные величины для АД МА36-41/8Ф

Магнитная проводимость		Параметры эквивалентной сети				
λ_{s2}	λ_{e2}	$r1$	$X\sigma1$	$X\mu$	$r'2$	$X'2$
3.479	0.380	0.0163	0.082	1.963	0.0236	0.1461

Зубцовая проводимость рассеяния зависит от изменения воздушного зазора в пределах области зубцового шага. Упомянутые отношения зависят от соотношения между шириной открытия щели воздушного промежутка и радиальной длине воздушного промежутка. Последний по радиальной оси зуба был определен из формулы

$$\delta = \delta_0 (1 - \varepsilon \cos \varphi) \quad (1)$$

где ε – эксцентриситет ротора; φ – пространственная угловая координата, подсчитанная при минимальной длине воздушного зазора (δ_{\min}).

Влияние неравномерности воздушного зазора на зубцовое рассеяние магнитной проводимости рассчитывалась по выражению [2]

$$\lambda_{r2} = \left[\frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{\delta^2}{b^2} + \frac{1}{4} \right) + 4 \frac{\delta}{b} \operatorname{arctg} \frac{b}{2\delta} \right] \quad (2)$$

Рассеяние магнитной проводимости λ_{r2} для рассматриваемого МА36-41/8Ф АД в однородном воздушном промежутке равняется 0.1227. Графическое представление λ_{r2} в зависимости от b/δ в пределах изменения $2\delta_0 \geq \delta \geq 0$ показывается на Рисунок 1 для двух координатных осей по оси абсцисс.

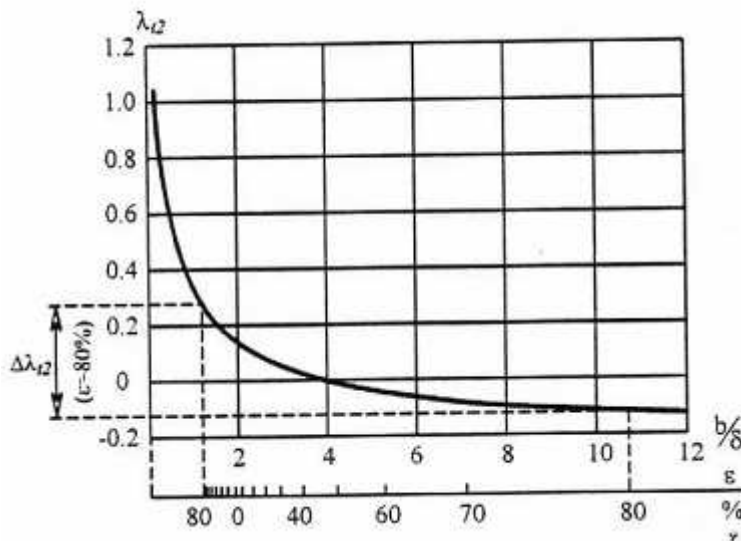


Рисунок 1. – Изменение в роторе зубцового рассеяния магнитной проводимости в МА36-41/8Ф АД в зависимости от соотношения b/δ

Конструкционная зависимость $\lambda_{r2}(\varepsilon)/\lambda_{r2}(0)$ рассчитанная с использованием кривой $\lambda_{r2}(b/\delta)$ представлена на Рисунок 2. При построении этого Рисунка принималось допущение, что

$$\Delta\lambda_{r2}(\varepsilon) = 0.5[\lambda_{r2}(\varepsilon)_{\delta_{\max}} - \lambda_{r2}(\varepsilon)_{\delta_{\min}}]$$

Соотношение, показанное на Рисунок 2, было рассчитано по уравнению

$$\lambda_{r2}(\varepsilon) = \frac{1}{Z_2} \sum_{Z_1} \lambda_{r2}(b/\delta(\varphi)) \quad (5)$$

где числитель представляется суммой зубовых рассеяний магнитной проводимости по каждому пазу.

Показанное выражение для расчета дифференциальной магнитной проницаемости ротора [2] имеет форму

$$\lambda_{d2} = 0.9 \frac{t_2 (q_2 K_{w2})^2 \rho_{D2} K_{op2}}{\delta K_{\delta}} \sigma_{D2} \quad (4)$$

где K_{op2} – коэффициент, зависящий от соотношения между раскрытием паза и пазовым шагом (t_2), $K_{op2} = 1 - 0.033b_{op2}^2 (t_2 \delta)^{-1}$; ρ_{D2} – коэффициент затухания ротора; q_2 – число зубцов на полюс и фазу; K_{w2} – обмоточный коэффициент; K_{δ} – коэффициент воздушного зазора

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} = \frac{t_1 \cdot t_2}{(t_1 - \gamma_1 \delta)(t_2 - \gamma_2 \delta)}; \quad (5)$$

σ_{D2} – коэффициент дифференциального потока утечки; γ_1, γ_2 – коэффициент, зависящий от b_s/δ ; b_s – ширина щели в воздушном промежутке; t_1, t_2 – щели ротора и статора.

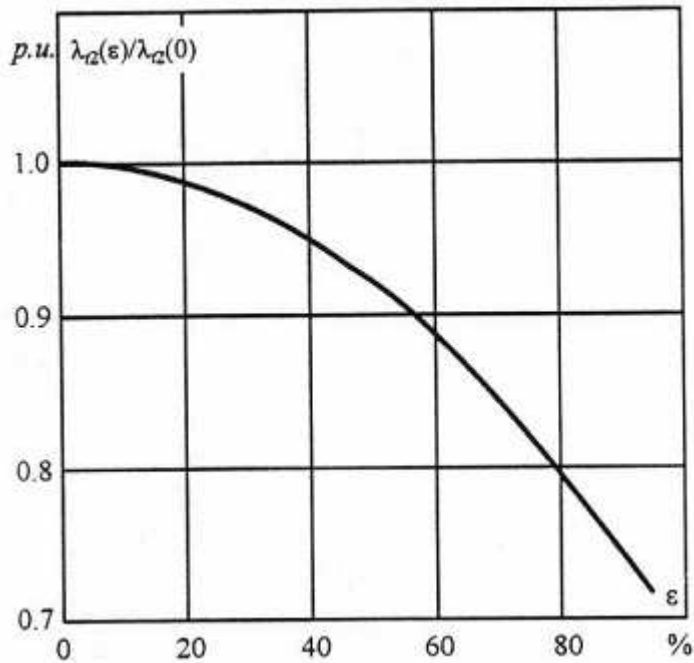


Рисунок 2. – Зависимость зубцового рассеяния магнитной проводимости от неравномерности ротора МА36-41/8Ф АД

Результаты расчета дифференциальной проводимости рассеяния в функции от эксцентриситета из уравнения представлены на Рисунок 3.

Зависимости $x_{t2}(\varepsilon)$ и $x_{d2}(\varepsilon)$ были получены с использованием уравнений

$$x_{t2}(\varepsilon) = C_x \lambda_{r2}(\varepsilon) \text{ and } x_{d2}(\varepsilon) = C_x \lambda_{d2}(\varepsilon)$$

где

$$C_x = \frac{x_{2*}(\varepsilon = 0)}{\sum \lambda(\varepsilon = 0)}$$

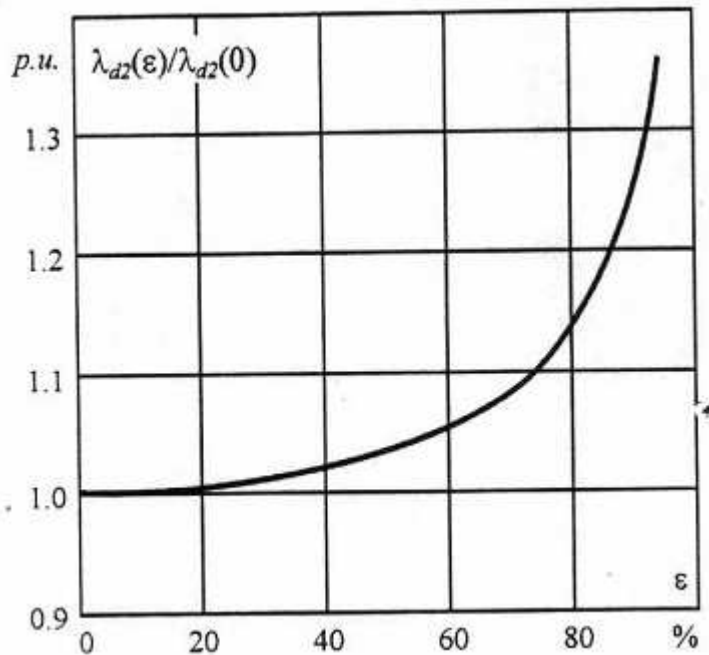


Рисунок 3. – Зависимость дифференциальной магнитной проводимости ротора с эксцентриситетом ротора МА36-41/8Ф АД

3. Моделирование воздействия неравномерности воздушного зазора на распад токов ротора после отключения АД от источника питания

3.1 – Анализ воздействия неравномерности на магнитную проницаемость промежутка АД

Вид главного взаимного сопротивления и сопротивления рассеяния рассматриваемого АД использовались для вычисления электромагнитных переходных процессов, а именно, угасание тока ротора от его начального значения и, следовательно, изменение со временем магнитной индукции.

В соответствии с известным выражением для определения удельной магнитной проводимости воздушного зазора учета зубчатости сердечника и явления насыщения

$$\lambda(\varphi) = \frac{\mu_0}{\delta(\varphi)} = \frac{\mu_0}{\delta_0(1 - \varepsilon \cos \varphi)} \quad (6)$$

Где в соответствии с гармоническим разложением Фурье $\lambda(\varphi) \approx \mu_0(\lambda_0 + \lambda_1 \cos \varphi)$; φ – электрический угол, определяющий положение ротора относительно координатной оси; λ_0, λ_1 – компоненты магнитной проницаемости при использовании самого простого ряда расширений [2],

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}, \quad \lambda_1 = 2 \frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2}}{\varepsilon(1 - \varepsilon^2)}$$

Учитывая влияние двухсторонней зубчатости сердечника (q1(2)) на основные гармоники магнитного потока воздушного промежутка [2]

$$\lambda'(\varphi) = \mu_0 \left[\left(1 - \frac{b_1}{t_1} - \frac{b_2}{t_2} \right) \frac{1}{\delta(\varphi)} + \frac{b_1}{t_1} \cdot \frac{1}{\delta(\varphi) + \frac{b_1}{5}} + \frac{b_2}{t_2} \cdot \frac{1}{\delta(\varphi) + \frac{b_2}{5}} \right] \quad (7)$$

Полученные результаты с использованием (7) для МА36-41/8Ф асинхронного двигателя показаны на Рисунок 4.

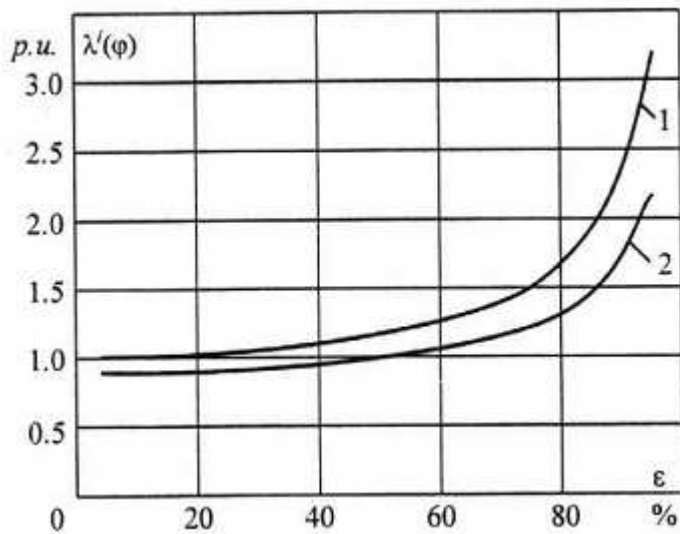


Рисунок 4. – Изменения в магнитной проницаемости АД в функции от эксцентриситета: 1 - $q_{1(2)} = 0$; 2 - $q_{1(2)} \neq 0$

Как показано на Рисунок 4 магнитная проницаемость воздушного промежутка по существу зависит от значений неравномерности более чем 50%.

3.2 – Переходные процессы после отключения АД от питающей цепи.

Фазный ток ротора (\bar{I}_2) может быть определен из уравнения для обмотки короткозамкнутого ротора с разомкнутой обмоткой статора. Уравнение ротора, которое использует набор параметров вращающихся с произвольной угловой скоростью ω_0 , может быть записано в виде

$$r_2 \bar{I}_2 + [p + j(\omega_0 - \omega)] \bar{\psi}_2 = 0 \quad (8)$$

где $\bar{\psi}_2$ - потокосцепление ротора равное своей собственной составляющей, $\bar{\psi}_2 = x_2 \bar{I}_2$

Использование d – и q – осевых параметров при роторной угловой скорости $\omega_0 = \omega$, мы можем получить следующее решение по вышеупомянутым исходным уравнениям

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{2(0)} \exp(-t/\tau_2), \quad (*)$$

где τ_2 – постоянная времени обмотки ротора, $\tau_2 = x_2 / r_2$

Результирующий фазный ток ротора \bar{I}_2 соответствует набору апериодических токов в фазах ротора

$$i_{2a} = \text{Re}[\bar{I}_2], \quad i_{2b} = \text{Re}[\bar{I}_2 a^2], \quad i_{2c} = \text{Re}[\bar{I}_2 a],$$

где $a = \exp(j2\pi/3)$, $a^2 = \exp(-j2\pi/3)$.

Изменение в потоке магнитной индукции ротора после отключения АД от источника питания соответствует выражению тока ротора

$$B(t) = B_0 e^{-t/\tau_2}. \quad (10)$$

Как наиболее хорошо можно предположить изменение напряжения через зажимы АД зависит от скорости ротора и магнитного насыщения по длине пути взаимного потока.

Изменение в магнитной индукции с учетом влияния эксцентриситета рассчитывалось с использованием следующих выражений

$$x'_{\sigma 2}(\varepsilon) = x'_{\sigma 2}(0) \frac{\sum \lambda(\varepsilon)}{\sum \lambda(0)}, \quad x'_\mu(\varepsilon) = x'_\mu \frac{\lambda(\varepsilon)}{\lambda(0)}$$

изображается на Рисунок 5,6.

Изменение роторной постоянной времени в разомкнутой обмотке статора рассчитывается по выражению

$$\tau_2 = [x'_{\sigma 2}(\varepsilon) + x'_\mu(\varepsilon)](r'_2)^{-1} \quad (11)$$

показывается на Рисунок 7.

Как может быть определено по графику изменение в потоке рассеяния магнитной индукции, в концепции, может использоваться в профилактической диагностике эксцентриситета АД в соответствии с рассматриваемым подходом.

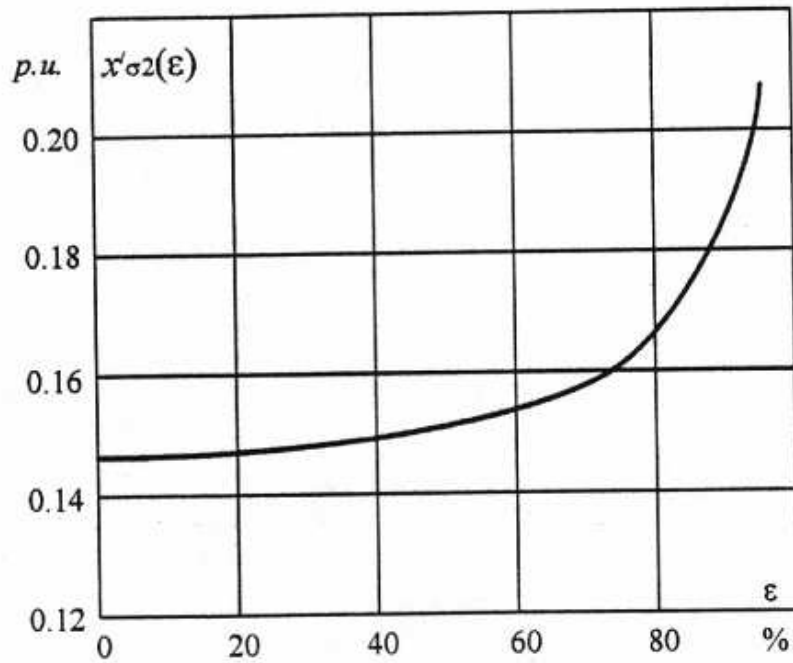


Рисунок 5. – Изменение индуктивного сопротивления в обмотках ротора МА36-41/8Ф АД

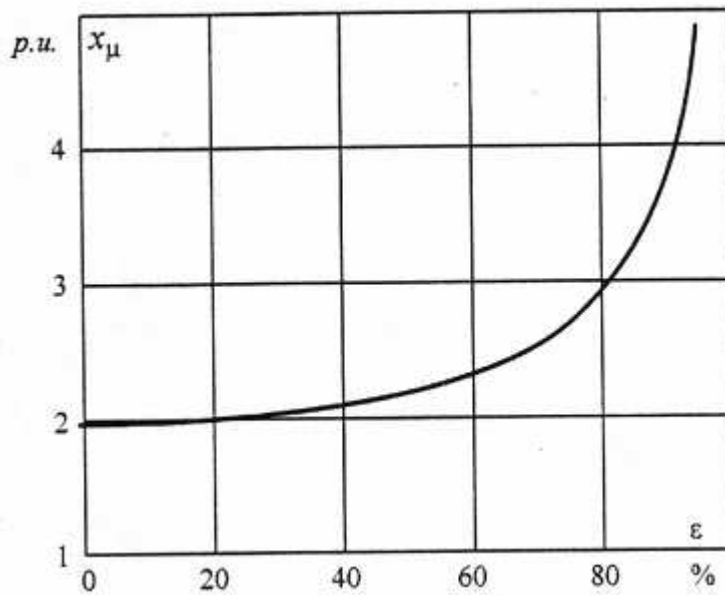


Рисунок 6. – Изменение общего индуктивного сопротивления МА36-41/8Ф АД

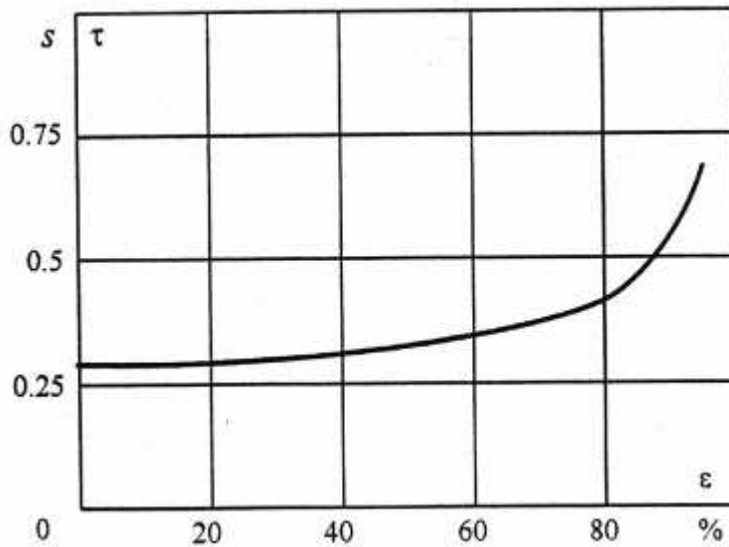


Рисунок 7. – Отношение постоянной времени ротора в функции эксцентриситета МА36-41/8Ф АД после отсоединения от источника

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Экспериментальная установка включала выше упомянутый уникально движущийся фазный ротор типа МА36-41/8Ф и устройство цифровой регистрации сигнала. АД был оборудован встроенными подшипниками эксцентриситетном диске. Мгновенные значения фазных токов i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} ротора, измеренные при нулевом и пятидесяти процентном уровне неравномерности, были использованы для расчета фазовых токов ротора по формуле

$$I_p(t) = \sqrt{\frac{2}{3} [i_{ra}^2(t) + i_{rb}^2(t) + i_{rc}^2(t)]} \quad (12)$$

Временные зависимости вышеупомянутых фазовых токов ротора и их различия показаны на Рисунок 8.

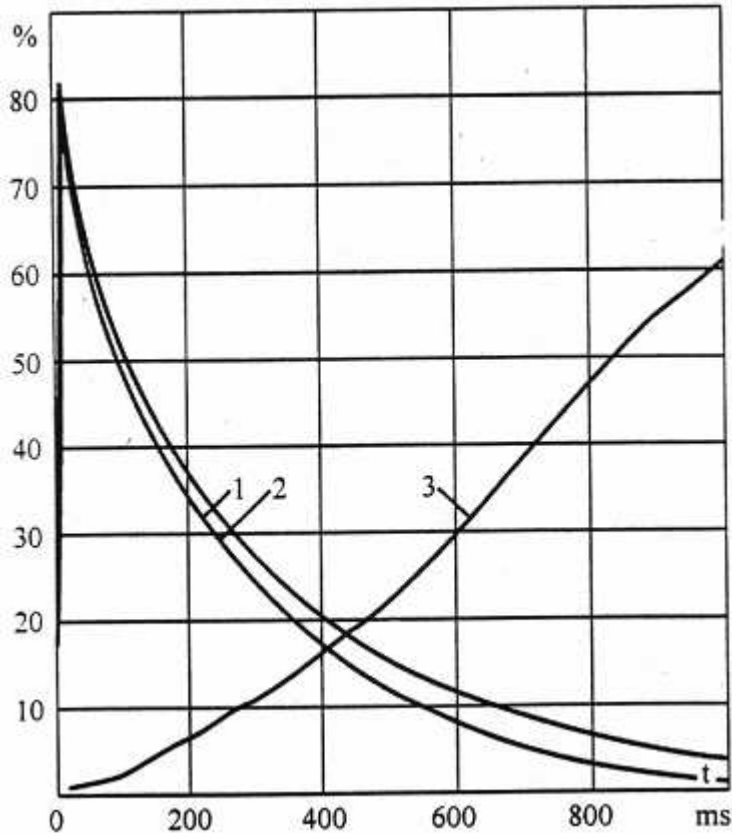


Рисунок 8. – Временные зависимости фазный токов ротора МА36-41/8ФАД: 1 – АД без неравномерности ($\epsilon=0$); 2 – АД с $\epsilon=50\%$; 3 – отклонение второй кривой от первой (стандартной)

Профилактическая диагностика неравномерности в АД может основываться на использовании методов распознавания образов или основанная на абсолютном отклонении между размерами в данное время кратными постоянной времени при нулевой неравномерности и найденной температурой. Стандартная постоянная времени (τ_{st}) должна быть предварительно уменьшена до текущей диагностической проверочной температуры по формуле

$$\tau'_{st} = \tau'_{st}(t_{d.ch}^o) = \tau_{st}(\tau_{st}^o) \frac{235 + t_{st}^o}{235 + t_{d.ch}^o} \quad (13)$$

Очевидно, в этом случае стандартная магнитная индукция при заданной температуре находимся по выражению

$$B_{st}(t) = B_{st}(0) \exp(t / \tau'_{st})$$

где $B_{st}(0) = B_{d.ch}(0) = 1.0$

Как видно из более уточненного анализа кривых 1,2 показанных на Рисунок 8, последние могут быть представлены несколькими показательными компонентами. Это явление согласуется с влиянием эффекта насыщения по пути основного магнитного потока и проявляется в начальной

стадии переходного процесса в коротком временном интервале (приблизительно 100 мс при $\varepsilon=0$ и 150 мс при $\varepsilon=50\%$).

В этом случае рассматриваемый АД был отключен от электрической сети при условии холостого хода. В первый момент отключения того же АД при номинальной нагрузке ток ротора будет меньше, чем в прежнем случае. Так, угасающие компоненты в токе ротора и поток рассеяния контура АД могут отсутствовать в диагностическом сигнале.

5. – ИТОГИ

Изменение потока рассеяния за пределами корпуса асинхронного двигателя, зависящего от скольжения ротора, может использоваться для определения неравномерности воздушного зазора АД после отключения от электрической сети.

Данные дисплея датчика Холла, в точках расположенных вблизи поверхности экрана, отражает натиск токов ротора, появляющихся в первый момент отключения статора. При смене временных периодов, из-за вращения ротора (в соответствии с законом электромагнитной инерции для результирующего потока рассеяния) и его магнитного потока рассеяния с роторной угловой скоростью относительно датчика Холла. Осциллограмма, записанная при диагностической проверке представляет, при определенном масштабе, не имеющие сил токи ротора, затухающие со временем. Очевидно, из показанного выше моделирования, что постоянная времени индукции потока рассеяния затухает обусловленная эксцентриситетом воздушного зазора.

ИСТОЧНИКИ

- [1] Rogozin, G.G.; Lapshina, N.S.: *Monitoring the uniformity of the air gap in induction motors from the value of, the synchronous reactance*. Electrichestvo, no. 11, pp.44-46, 1981 (in Russian).
- [2] Sergeev, P.S.; Vinogradov, N.N.: *Design of electrical mashines*. ■ Moscow: Energia Publishers, 1970 (in Russian).
- [3] Geller, B.; Gamata, V.: *Higher harmonics in asynchronous machines*. Moscow: Energia Publishers, 1981 (in Russian).