

ВИБРОДИАГНОСТИКА НЕСИММЕТРИИ
ФАЗНОГО ТОКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А. В. ЛУКЬЯНОВ, А. И. РОМАНОВСКИЙ
ФГБОУ ВПО «ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»
Иркутск, Россия

В реальных условиях эксплуатации асинхронного электропривода вспомогательных машин электровоза часто его отдельные фазы нагружены несимметрично в силу ряда внутренних и внешних причин. Электромагнитные силы, действующие в воздушном зазоре между статором и ротором асинхронных электродвигателей, имеют характер вращающихся или пульсирующих силовых волн. Максимальная вибрация возбуждается основной волной вращающегося магнитного поля. Несимметрия фазных токов приводит к возрастанию тангенциальной вибрации и пульсирующего вращающего момента на удвоенной частоте сети. Радиальные силы также способствуют деформации и колебаниям статора.

Рассмотрим механизм возникновения моментов и радиальной вибрации при несимметрии фазного тока. Значение и распределение радиальных и тангенциальных магнитных сил в воздушном зазоре определяется как [1]:

$$p_r = 4 \cdot 10^5 \cdot b^2(\vartheta, t); \quad p_\tau = a(\vartheta, t) \cdot b(\vartheta, t) \cdot 10^2,$$

где $a(\vartheta, t)$ – линейная токовая нагрузка статора или ротора; $b(\vartheta, t) = f(\vartheta, t) \cdot \Lambda(\vartheta, t)$ – магнитная индукция в воздушном зазоре в точке с координатой ϑ в момент времени t ; $f(\vartheta, t)$ и $\Lambda(\vartheta, t)$ – мгновенные значения результирующей м.д.с. обмоток статора и ротора и магнитной проводимости зазора.

$$\begin{aligned} a(\vartheta, t) &= A_1 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{a1}) + A_2 \cos(p\vartheta + \omega_1 t - \varphi_{a2}); \\ b(\vartheta, t) &= B_1 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b1}) + B_2 \cos(p\vartheta + \omega_1 t - \varphi_{b2}), \end{aligned}$$

где A_1, A_2, B_1, B_2 – линейная токовая нагрузка статора и индукция результирующего магнитного поля в воздушном зазоре прямого и обратного следования фаз; p – число пар полюсов, $\omega_1 = 2\pi f_c$; f_c – частота сети (50 Гц); $\varphi_{a1}, \varphi_{a2}$ – фазы прямого и обратного тока статора; $\varphi_{b1}, \varphi_{b2}$ – фазы индукции магнитного поля в зазоре прямого и обратного следования фаз. Получены точные значения тангенциальных p_τ и радиальных p_r сил:

$$\begin{aligned}
p_\tau = & 0,5 \cdot [A_1 B_1 \cos(2p\vartheta - 2\omega_1 t - \varphi_{a1} - \varphi_{b1}) + A_1 B_1 \cos(\varphi_{b1} - \varphi_{a1}) + \\
& + A_1 B_2 \cos(2p\vartheta - \varphi_{a1} - \varphi_{b2}) + A_1 B_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_{a1} - \varphi_{b2}) + \\
& + A_2 B_1 \cos(2p\vartheta - \varphi_{a2} - \varphi_{b1}) + A_2 B_1 \cos(2\omega_1 t - \varphi_{a2} + \varphi_{b1}) + \\
& + A_2 B_2 \cos(2p\vartheta + 2\omega_1 t - \varphi_{a2} - \varphi_{b2}) + A_2 B_2 \cos(\varphi_{b2} - \varphi_{a2})]; \\
p_r = & \frac{1}{4\mu_0} \cdot [(B_1^2 + B_2^2) + B_1^2 \cos 2(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b1}) + B_2^2 \cos 2(p\vartheta + \omega_1 t - \varphi_{b2})] + \\
& + \frac{1}{2\mu_0} \cdot [B_1 B_2 \cos(2p\vartheta - \varphi_{b1} - \varphi_{b2}) + B_1 B_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_{b1} + \varphi_{b2})] .
\end{aligned} \tag{9}$$

После интегрирования по угловой координате ϑ выражения вращающего момента: $M_{вр} = 2\pi R^2 l \int_0^{2\pi} p_\tau d\vartheta$, получим:

$$\begin{aligned}
M_{вр} = & \pi R^2 l [A_1 B_1 \cos(\varphi_{b1} - \varphi_{a1}) + A_2 B_2 \cos(\varphi_{b2} - \varphi_{a2}) + \\
& + A_1 B_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_{a1} - \varphi_{b2}) + A_2 B_1 \cos(2\omega_1 t - \varphi_{a2} + \varphi_{b1})]
\end{aligned}$$

Уравнение вращающего момента содержит постоянные и периодически изменяющиеся от времени составляющие с удвоенной круговой частотой сети. На рис.1 приведен график изменения этих составляющих вращающего момента от степени несимметрии тока в фазах I_2 / I_1 , (I_1, I_2 – токи прямой и обратной последовательности) для электродвигателя экспериментальной установки.

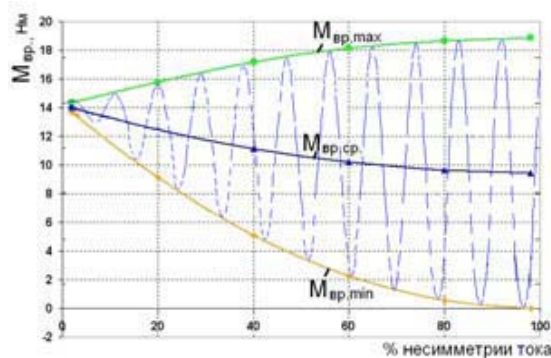


Рис. 1. График изменения вращающего момента электродвигателя АИР90Л4У3 от несимметрии тока одной фазы

Интегрирование тангенциальной силы по частям в пределах половины периода $T/2$, т.е. в пределах половины полюсного деления $\vartheta_0 = 0; \vartheta_1 = \pi/4$ (при числе пар полюсов $p = 2$) в общем интервале $\vartheta = 0 \div \pi/2$, дает возможность перейти от распределенной по кольцевому зазору системы тангенциальных сил P_τ к двум эквивалентным сосредоточенным силам: $P_{\Sigma \max}$ и $P_{\Sigma \min}$ (рис. 2), приложенным на межполюсном делении с угловым интерва-

лом $\pi/4$ и вращающимся вместе с электромагнитным полем статора со сдвигом по времени на половину периода $T/2$. Здесь же приведено результирующее значение $P_{\Sigma\Sigma}$ двух интегральных сил для 100 % несимметрии тока.

Спектр функции $P_{\Sigma\Sigma}$ приведен на рис. 3. Соотношение спектральных составляющих на частотах кратных 100 Гц можно выразить полиномиальной зависимостью:

$$A_{n \cdot 100} = A_{100}(-9,3 \cdot 10^{-7} \cdot f^3 + 8,6 \cdot 10^{-4} \cdot f^2 - 0,26 \cdot f + 26,9),$$

где $n = 2, 3, 4$; $A_{n \cdot 100}$ – амплитуда колебаний тангенциальной силы на гармониках $n \cdot 100$ Гц; A_{100} – амплитуда колебаний тангенциальной силы на гармонике 100 Гц; x – частота, Гц.

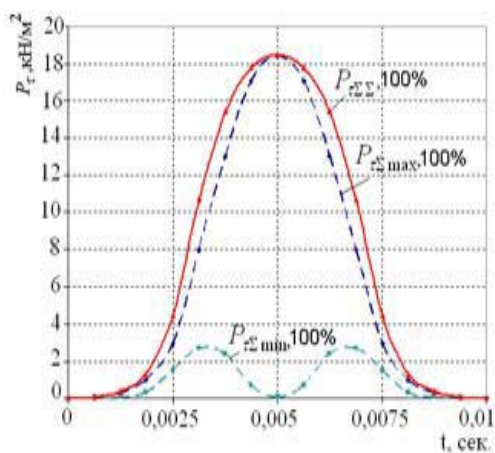


Рис. 2. Значение $P_{\Sigma\Sigma}$ для 100 % несимметрии тока

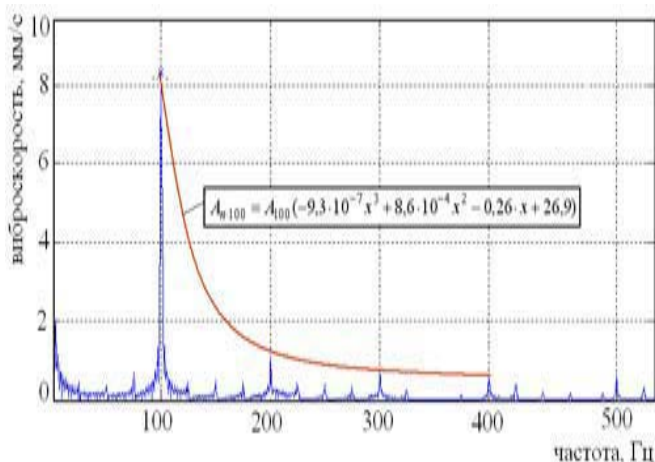


Рис. 3. Спектр результирующей силовой функции $P_{\Sigma\Sigma}$

При интегрировании распределенной радиальной силы p_r по всему кольцевому зазору получим силу электромагнитного притяжения ротора к статору, при интегрировании p_r в пределах межполюсного деления, получим силы, деформирующие статор.

Таким образом, выявлены дополнительные вибрационные признаки несимметрии тока в фазах: наличие в спектре виброскорости не только составляющей на двойной частоте сети 100 Гц, но и ее первых 2–3-х гармоник на частотах 200, 300, 400 Гц убывающей амплитуды. При значительной несимметрии вокруг этих гармоник появляются модуляционные составляющие с частой вращения ротора (рис. 4).

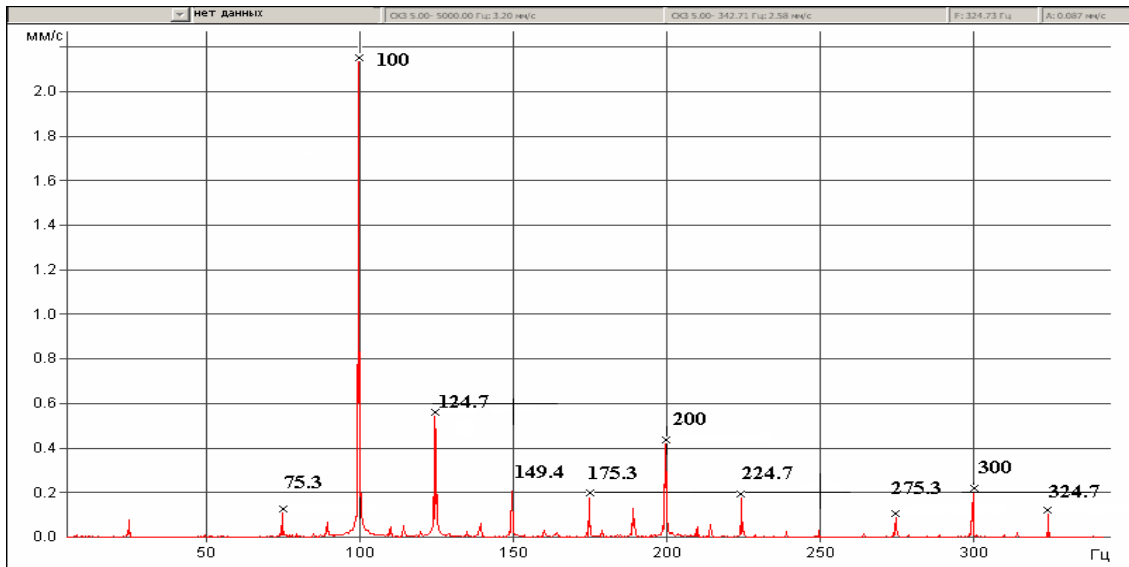


Рис. 4. Спектр виброскорости на электродвигателе АИР90L4У3 при обрыве фазы (100 % несимметрия фазного тока), оборотная частота 24,73 Гц

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубов, И. Г. Шум и вибрация электрических машин / И. Г. Шубов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1986. – 208 с.