ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА
Том 161 1967

АНАЛИЗ И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ РОТОРНО-ИНДУКТОРНОЙ ЦЕПИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ РОТОРОВ

А. И. ЗАЙЦЕВ, М. П. ТАБИНСКИЙ

(Рекомендована научным семинаром электромеханического факультета)

Литейные дефекты короткозамкнутого ротора ухудшают рабочие характеристики асинхронного двигателя. Несмотря на строгий пооперационный контроль во время изготовления двигателя, дефект ротора зачастую удается обнаружить только при контрольном испытании собранной машины, когда исправить его уже нельзя, и ротор приходится выбрасывать в утиль. Это приводит к значительной затрате труда, времени и материалов, срывает ритмичность выпуска двигателей. Между тем, бракованный ротор можно перезалить, если обнаружить дефект до механической обработки ротора. По данным завода «Кузбассэлектромотор», дефекты литья роторов причиняют заводу ежегодно убыток около 20 000 руб. Не исследован еще вопрос, как влияет допустимая по заводским нормам несимметрия ротора на надежность двигателя. Как известно, допускается несимметрия ротора, приводящая к пятипроцентному колебанию тока статора при опыте короткого замыкания.

По [1], обрыв одного стержня из 46 уже недопустим, а в этом случае, как показывает опыт, колебание тока короткого замыкания не превышает 2%.

В настоящее время отсутствует эффективный контроль качества заливки роторов до механической обработки. Предлагаемые в разное время методы контроля не нашли применения в производстве из-за сложности, низкой чувствительности, или низкой производительности [2, 3].

Авторами предложена, сконструирована и испытана установка для контроля роторов до механической обработки, свободная от этих недостатков. Установка обладает универсальностью, так как на ней можно контролировать ротора различных габаритов, с любой конфигурацией и числом пазов.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

Контролируемый ротор 1 помещается на двух параллельных, синхронно вращающихся в одну сторону, стальных цилиндрических валках 2. Под ротором установлен индуктор 3 с Ш-образным сердечником. На среднем магнитопроводе индуктора намотана обмотка возбужде-

ния, которая подключается к сети переменного тока промышленной частоты. На двух крайних магнитопроводах намотаны измерительные обмотки, соединенные встречно. Индуктор может перемещаться с помощью ходового винта по вертикальным направляющим, что позволяет устанавливать оптимальный зазор между ротором и индуктором при различных диаметрах ротора. Зазор может достигать 2 *мм* и более.

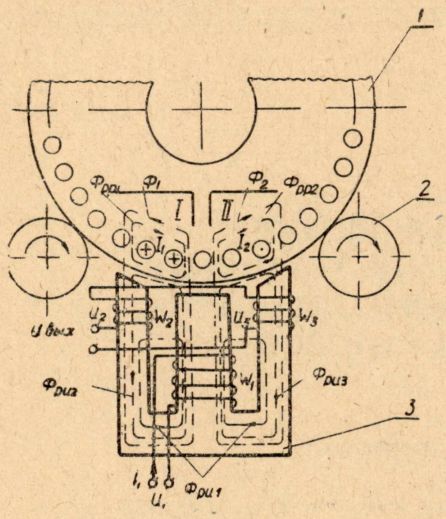

Рис. 1.

Ток i_1, протекающий по обмотке индуктора ω_1, создает в среднем магнитопроводе магнитный поток, который замыкается по крайним магнитопроводам индуктора через два участка ротора I и II и по путям рассеяния.

Магнитные потоки, пронизывающие I и II участок ротора, индуктируют в стержнях этих участков э. д. с., благодаря чему возникают токи ротора $I_{(u)1}$ и $I_{(u)2}$, которые создают свои магнитные потоки, направленные навстречу возбуждающим потокам. В результате в магнитной цепи потоки распределяются, как указано на рис. 1, где обозначено: $\Phi_{ри1}$; $\Phi_{ри2}$; $\Phi_{ри3}$ — первые, вторые и третьи потоки рассеяния индуктора; Φ_1 и Φ_2 — потоки, сцепленные со стержнем ротора и обмоткой индуктора ω_1

Потоки Φ_1 и $\Phi_{ри\,2}$ индуктируют в измерительной обмотке w_2 напряжение $\dot{U}_2$, потоки Φ_2 и $\Phi_{ри\,3}$ индуктируют в обмотке w_3 напряжение $\dot{U}_3$.

Измерительные обмотки w_2 и w_3 соединены по дифференциальной схеме и на выходных зажимах возникает разность напряжений

$$\dot{U}_{вых} = \dot{U}_2 - \dot{U}_3.$$

Если в I и II контуре ротора находятся стержни с одинаковыми сопротивлениями, то потоки Φ_1 и Φ_2 будут одинаковыми. Потоки $\Phi_{ри2}$ и $\Phi_{ри3}$ одинаковые в силу симметричности индуктора. Выходное напряжение в этом случае равно нулю.

Литейные дефекты стержней образуют раковины, сужения и разрывы, что приводит к изменению активного сопротивления стержней. Рассмотрим случай, когда активное сопротивление первого контура ротора больше сопротивления второго контура. В этом случае ток второго контура создает магнитный поток, вытесняющий возбуждающий поток индуктора в первый участок, что приводит к увеличению потока Φ_1 ($\Phi_1 > \Phi_2$). В результате напряжение $\dot{U}_2$ становится больше напряжения $\dot{U}_3$, и разность напряжений $\dot{U}_2 - U_3$ может достигать значительной величины.

Литейный дефект при вращении ротора перемещается с первого участка во второй, поэтому на один дефект литья приходит два максимума напряжения $\dot{U}_{вых}$.

Для определения чувствительности установки к различным литейным дефектам стержней ротора целесообразно представить реальный индуктор вместе с исследуемым ротором схемой замещения. Принцип работы установки и физические процессы, протекающие в ней, не изменятся, если Ш-образный магнитопровод индуктора заменить двумя

П-образными магнитопроводами с двумя обмотками возбуждения w_I и w_{II}, имеющими по w_1 витков, соединенными последовательно. Таким образом, Ш-образный индуктор вместе с ротором аналогичен по принципу действия двум трансформаторам, у которых первичные обмотки соединены последовательно, а вторичные обмотки замкнуты на сопротивления R_{p1} и R_{p2} Приведенная схема замещения изображена на рис. 2, где обозначено:

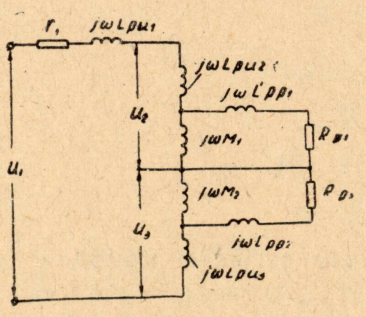

Рис. 2.

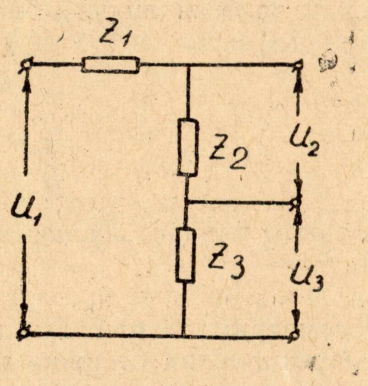

Рис. 3.

r_1 — суммарное активное сопротивление обмоток возбуждения w_I и w_{II} индуктора;

$L_{ри\,1}$; $L_{ри\,2}$; $L_{ри\,3}$ — первая, вторая и третья индуктивность рассеяния обмоток возбуждения w_I и w_{II} индуктора;

M_1; M_2 — взаимоиндуктивности обмоток возбуждения индуктора w_I и w_{II} с роторными контурами I и II;

$L'_{pp\,1}$ L'_{pp2} — приведенные индуктивности рассеяния роторных контуров I и II;

$R'_{p\,1}$; $R'_{p\,2}$ — приведенное активное сопротивление обмотки ротора.

Схему замещения рис. 2 можно преобразовать к последовательному соединению эквивалентных сопротивлений (рис. 3):

$$z_1 = r_1 + j\omega L_{ри\,1}\,. \tag{1}$$

$$z_2 = j\omega L_{ри\,2} + \frac{(R'_{p2} + j\omega L'_{pp1})\, j\omega M_1}{R'_{p1} + j\omega\,(M_1 + L'_{pp1})}, \tag{2}$$

$$z_3 = j\omega L_{ри\,3} + \frac{(R'_{p2} + j\omega L'_{pp2})\, j\omega M_2}{R'_{p2} + j\omega\,(M_2 + L'_{pp2})}. \tag{3}$$

Напряжение на измерительных обмотках равно:

$$\dot{U}_1 = \frac{w_2}{w_I}\, i_1 z_2, \tag{4}$$

$$\dot{U}_2 = \frac{w_3}{w_{II}}\, i_1 z_3. \tag{5}$$

Так как измерительные обмотки соединены последовательно-встречно, то выходное напряжение $\dot{U}_{вых}$ равно разности напряжений $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$.

Учитывая, что $w_2 = w_3 = w_и$, и что $w_I = w_{II} = w_I$ из формул (4) и (5) следует:

$$\dot{U}_{вых} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \frac{w_и}{w_1} i_1 (z_2 - z_3) =$$

$$= i_1 \frac{w_и}{w_1} \left[\frac{(R'_{p1} + j\omega L'_{pp1}) j\omega M_1}{R_{p1} + j\omega (M_1 + L'_{pp1})} - \frac{(R'_{p2} + j\omega L'_{pp2}) j\omega M_2}{R'_{p2} + j\omega (M_2 + L'_{pp2})} \right]. \quad (6)$$

В силу симметричности электромагнитной цепи установки при отсутствии дефектов литья обмотки ротора справедливы равенства:

$$M_1 = M_2 = M, \quad (7)$$

$$L'_{pp1} = L'_{pp2} = L'_{pp}. \quad (8)$$

$$R'_{p1} = R'_{p2} = R'_p. \quad (9)$$

В таком случае, согласно формуле (6)

$$\dot{U}_{вых} = 0.$$

Рассмотрим случай, когда литейные дефекты приводят к изменению сопротивления стержня на первом участке ротора на величину $\Delta R'$, и допустим, что равенства (7) и (8) при этом не изменилось. На измерительных обмотках появится напряжение:

$$\dot{U}_{вых} = i_1 \frac{w_и}{w_1} \left[\frac{(R'_p + \Delta R' + j\omega L'_{pp}) j\omega M}{R'_p + \Delta R' + j\omega (M + L'_{pp})} - \frac{(R'_p + j\omega L'_{pp}) j\omega M}{R'_p + j\omega (M + L'_{pp})} \right]. \quad (10)$$

Сопротивлениями R'_p и $\Delta R'$ в знаменателях дробей можно пренебречь, так как их величины намного меньше по сравнению с индуктивными сопротивлениями схемы замещения. После несложных преобразований получим

$$\dot{U}_{вых} \approx j_1 \frac{w_и}{w_1} \frac{M \Delta R'}{M + L'_{pp}}. \quad (11)$$

Эта формула хорошо согласуется с опытом, если

$$\Delta R' \leqslant 5 R'_p \quad и \quad \Delta R' + R'_p \leqslant 0{,}1\, j\omega (M + L'_{pp}).$$

Аналогично выводится формула для расчета выходного напряжения при обрыве одного стержня на первом участке ротора ($\Delta R = \infty$):

$$\dot{U}_{вых} \approx i_1 \frac{w_и}{w_1} j\omega M \left(1 - \frac{1}{M + L'_{pp}} \right). \quad (12)$$

Необходимо отметить, что в действительности $M_1 > M_2$, так как на величину взаимоиндуктивности влияет вытеснение магнитного потока с участка ротора, где стержень целый, в участок с оборванным стержнем. Поэтому замеренная опытным путем величина $\dot{U}_{вых}$ на $20 \div 30\%$ больше расчетной при принятии равенства $M_1 = M_2$.

На рис. 4 приведена осциллограмма выходного напряжения индуктора $\dot{U}_{вых}$ при проверке ротора двигателя КО 22-4 с одним оборванным стержнем. Ротор необработанный. Для осциллографирования напряжение выпрямлялось и сглаживалось.

На рис. 5 приведена осциллограмма напряжения $\dot{U}_{вых}$ при исследовании на установке ротора двигателя КО 22-4, забракованного испытательной станцией по 5%-му колебанию тока короткого замыкания. На осциллограмме отчетливо виден характер литейного брака: два оборванных стержня, расположенные рядом (а) и два оборванных стержня, размещены по окружности ротора (*б*, *в*).

Экспериментальная проверка предлагаемого способа определения литейных дефектов проводилась в производственных условиях на Кемеровском электромоторостроительном заводе «Кузбассэлектромотор».

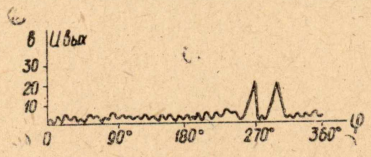

Рис. 4.

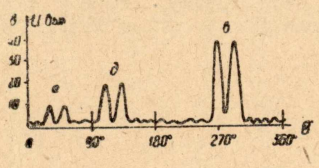

Рис. 5.

Основные технические данные проверяемых роторов даны в табл. 1.

Пазы роторов закрытые. Ротора испытывались необработанными, непосредственно после заливки на центробежной машине и остывания до температуры ок. 100°С.

Таблица 1

Тип двигателя	Диаметр ротора	Длина ротора	Форма паза	Количество
КО-12—4	180	200	Двухклеточный	46
КО-12—6	185	200	»	46
КО-22—4	205	230	»	46
КОФС-21—2	195	165	Глубокий	28

В результате испытаний установлено, что на установке четко фиксируются линейные дефекты стержней, приводящие к 2%-му колебанию тока при опыте короткого замыкания собранного двигателя

$$\left(\frac{i_{\text{макс}} - i_{\text{мин}}}{i_{\text{макс}}} \cdot 100 \leqslant 2\% \right).$$

Выходное напряжение при прохождении над индуктором участка ротора с оборванным стержнем на 50% больше, чем при нормальном стержне (25 *в* и 5 *в* соответственно). При наличии литейного дефекта, приводящего к изменению активного сопротивления стержня на 40%, выходное напряжение становится на 100% больше, чем при нормальном стержне (10 и 5 *в* соответственно).

Процесс контроля, установки и снятия ротора диаметром 200 *мм* и весом 50 *кг* занимает не более 30 *сек.* времени.

Испытания показали, что шероховатость и местные загрязнения ротора толщиной до 2 *мм* не оказывают заметного влияния на работу установки.

Выводы

Предложенная установка для определения литейных дефектов при заливке ротора простая в изготовлении и эксплуатации, обладает большой чувствительностью. Простота эксплуатации и измерения позволяет легко автоматизировать операцию контроля качества заливки роторов асинхронных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hiller, Ute—Maria: Einfluß fehlender Läuferstäbe auf die elekrischen Eigenschaften von Kurzschlußläufermotoren. ETZ—A, 1962, № 4.

2. А. В. Сафронов. Методы обнаружения дефектов роторов асинхронных двигателей, ЦБТИ, Москва, 1959.

3. Дан Теодореску. Новый способ определения литейных дефектов стержней короткозамкнутых роторов. ВЭП, 1963, № 7.