

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ В НИХ ДЕФЕКТОВ

**Полковниченко Д.В.**

*Донецкий государственный технический университет*

*ivp@elf.dgtu.donetsk.ua*

*Are brought the results of mathematical modeling of establishing work routines of asynchronous electric motors attached to presence of locking stator winding coils, ragged parallel stator winding branches and rotor bars.*

Существующие методы диагностики технического состояния электродвигателей оказываются малоэффективными для применения на работающей машине и не могут предупреждать о возникновении дефектов на ранней стадии их возникновения.

Главная трудность в решении данной задачи заключается в том, что пока недостаточно исследованы отдельные неисправности электрических машин на предмет получения диагностической информации и не определены специальные информативные параметры или признаки (диагностические параметры), характеризующие изменение величин и характеристик электромагнитного, вибрационного и акустического процессов их функционирования при возникновении соответствующих неисправностей [1].

На основании анализа повреждений электродвигателей, а также по результатам экспериментальных исследований [2], был сделан вывод об универсальности использования в качестве диагностического параметра тока обратной последовательности (ОП). Его универсальность заключается в том, что возникновение практически любого дефекта приводит к изменению тока ОП.

Для проверки сделанных заключений и получения зависимостей тока ОП от степени развития дефектов были проведены исследования установившихся режимов работы асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором (КЗР) на математической модели. Одной из задач исследований был выбор математических моделей АД для определения пороговых значений диагностических параметров при возникновении различных видов дефектов и проверка степени их адекватности, т.к. от этого в большой степени зависит достоверность оценки технического состояния электродвигателя.

Для исследования установившихся режимов работы АД при наличии поврежденных стержней КЗР была использована математическая модель [3] для расчета мгновенных значений токов и напряжений, составленная на основе полных дифференциальных уравнений в фазных координатах статора ( $a, b, c$ ) и в фазных координатах ротора ( $1, 2, \dots, n$ ) с учетом того, что глубокопазный ротор представлен в виде эквивалентного двухклеточного. При этом количество фаз в обмотке ротора равняется числу короткозамкнутых стержней ротора. Отличительной особенностью данной модели является то, что она может быть применена для глубокопазных АД с учетом явления вытеснения тока в роторе.

Исходными данными для математического моделирования являются параметры двухконтурной схемы замещения АД, расчет которых производится по каталожным данным АД в соответствии с методикой, приведенной в работе [4].

На основании исследований, проведенных для АД различных типов и с различными конструктивными особенностями, были получены обобщенные зависимости коэффициента ОП по току (относительное содержание тока ОП в токе статора) при обрыве одного стержня от количества пазов КЗР для АД различного конструктивного исполнения в номинальном режиме работы (рис.1). Расчеты для различных коэффициентов загрузки АД (0,5-1,0) показали, что величина коэффициента ОП по току  $K_{21}$  примерно прямо пропорциональна коэффициенту загрузки АД  $K_{загр}$

$$K_{доп} = K_{доп.ном.} \cdot K_{загр}$$

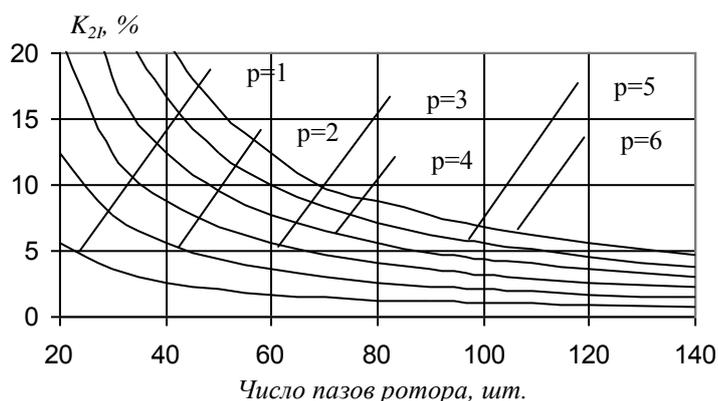


Рисунок 1 – Обобщенные зависимости коэффициента ОП по току  $K_{21}$  при обрыве одного стержня от числа пазов КЗР для АД с различным числом пар полюсов  $p$

Известно, что при обрыве стержня КЗР происходит снижение потребляемой активной мощности АД и одновременно уменьшается частота вращения ротора, т.е. увеличивается скольжение АД. Таким образом, целесообразным является использование в качестве диагностического параметра отношения активной мощности на валу АД к скольжению  $P/S$ .

Анализ полученных зависимостей отношения  $P/S$  от количества оборванных стержней КЗР при различных коэффициентах загрузки АД показал, что величина отношения  $P/S$  при обрыве одного стержня с достаточной степенью точности может рассчитываться по выражению

$$\frac{P}{S} = \frac{\frac{P_{расч}}{P_{ном}} \cdot (Z_2 - 1)}{\frac{S_{расч}}{S_{ном}} \cdot (Z_2 + 1)},$$

где  $P, P_{ном}$  – соответственно расчетная и номинальная мощности АД;  
 $S, S_{расч}$  – соответственно расчетное и номинальное скольжение АД;  
 $Z_2$  – число пазов КЗР.

Таким образом, проведенные исследования показали, что коэффициент ОП по току и отношение  $P/S$  обладают хорошей информативностью при диагностировании технического состояния КЗР. Диагноз «обрыв стержня КЗР» ставится в случае превышения диагностическими параметрами своих пороговых значений. При этом частота тока ОП является функцией скольжения  $S$  и определяется по выражению [5]

$$f_2 = f_1(1 - 2S),$$

где  $f_1$  – частота питающего напряжения.

Для исследования зависимости диагностических параметров в рабочем режиме АД при наличии витковых замыканий в обмотке статора использовалась модель, описание которой приведено в работе [6]. Модель основана на определении собственных и взаимных индуктивностей контуров обмотки статора. Это связано с тем, что при замыкании небольшого числа витков обе части обмотки статора расположены в одних и тех же пазах, поэтому их взаимоиндукция велика. Индуктивность замкнутых витков мала, и при относительно небольшом токе в остальной части обмотки ток в поврежденных витках может достичь больших значений.

Исследования, проведенные на математической модели для АД различной мощности серий и типов ДАЗО2 16-го и 18-го габаритов, ДАЗО4, АДД2, АДД4, А и АЗ 12-го и 13-го габаритов, АВ и АВК, показали, что на начальной стадии развития виткового замыкания (т.е. в области действия системы диагностики) зависимость коэффициента ОП по току  $K_{2I}$  от количества замкнувшихся витков с достаточной степенью точности может быть представлена кривой, приведенной на рис.2.

Заключение о возникновении виткового замыкания в обмотке статора делается в случае увеличения тока ОП и одновременного увеличения фазных токов АД. При этом ток в поврежденной фазе увеличивается значительно больше, чем в «здоровых» фазах, а частота тока ОП равна частоте питающего напряжения.

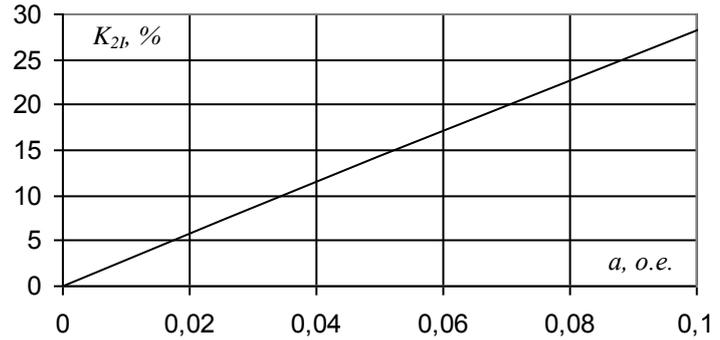


Рисунок 2 – Обобщенная зависимость коэффициента ОП по току  $K_{2I}$  от количества замкнувшихся витков обмотки статора АД  $a$

Обрыв параллельных ветвей обмотки статора также приводит к появлению тока ОП. При расчете обрывов параллельных ветвей обмотки статора приняты следующие допущения:

- сопротивления всех параллельных ветвей всех фаз приняты равными;
- взаимоиндуктивности между параллельными ветвями одной фазы равны;
- взаимоиндуктивности между ветвями различных фаз равны.

В результате проведенных расчетов была получена система из трех уравнений, где неизвестными являются токи в параллельных ветвях фаз  $\bar{I}_{1A}, \bar{I}_{1B}, \bar{I}_{1C}$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{U}_{AB}Y_B - \bar{U}_{CA}Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} &= j\omega(L + M_1)(m - n_a)\bar{I}_{1A} + 3j\omega M_2(m - n_b)\bar{I}_{1B} + 3j\omega M_2(m - n_c)\bar{I}_{1C}; \\ \frac{\bar{U}_{BC}Y_C - \bar{U}_{AB}Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C} &= j\omega(L + M_1)(m - n_b)\bar{I}_{1B} + 3j\omega M_2(m - n_a)\bar{I}_{1A} + 3j\omega M_2(m - n_c)\bar{I}_{1C}; \\ \frac{\bar{U}_{CA}Y_A - \bar{U}_{BC}Y_B}{Y_A + Y_B + Y_C} &= j\omega(L + M_1)(m - n_c)\bar{I}_{1C} + 3j\omega M_2(m - n_a)\bar{I}_{1A} + 3j\omega M_2(m - n_b)\bar{I}_{1B}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $Y_A, Y_B, Y_C$  – проводимости фаз обмотки статора;

$\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}, \bar{U}_{CA}$  – вектора питающих напряжений;

$\omega$  – угловая частота сети;  
 $M_1$  – взаимоиנדуктивностъ между ветвями одной фазы;  
 $M_2$  – взаимоиנדуктивностъ между ветвями разных фаз;  
 $m$  – число параллельных ветвей обмотки статора;  
 $n_a, n_b, n_c$  – число оборванных ветвей по фазам статора.

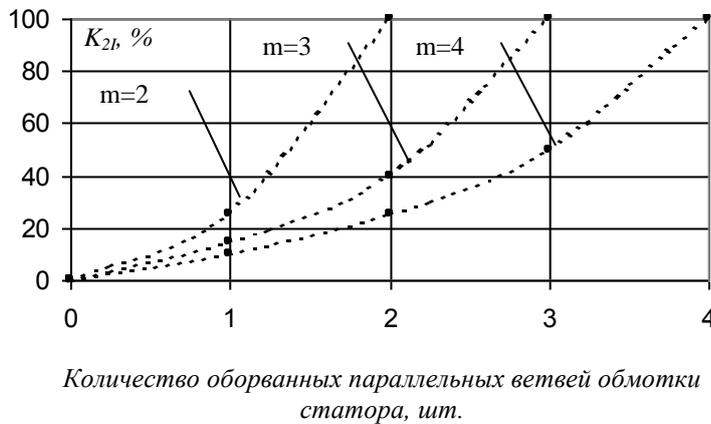


Рисунок 3 – Обобщенные зависимости коэффициента ОП по току  $K_{2l}$  от количества оборванных параллельных ветвей обмотки статора АД

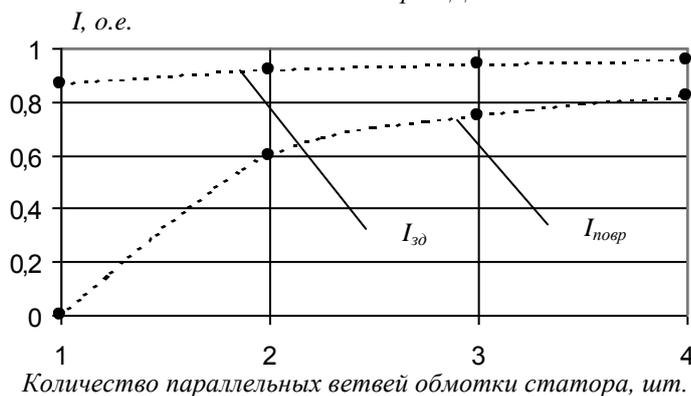


Рисунок 4 – Зависимости токов в «здоровых»  $I_{3д}$  и поврежденной  $I_{повр}$  фазах от количества параллельных ветвей обмотки статора при обрыве одной из этих ветвей в одной фазе

По найденным из (1) токам в параллельных ветвях обмотки статора определяется величина тока ОП.

На рис.3 приведены обобщенные зависимости коэффициента ОП по току  $K_{2l}$  от количества оборванных параллельных ветвей обмотки статора для АД с различным числом таких ветвей (2, 3, 4).

Приведенные результаты показывают, что ток ОП позволяет с большой точностью выявлять обрыв параллельных ветвей статорных обмоток электродвигателей. Частота тока ОП при этом равна частоте питающего напряжения. Поврежденная фаза находится по величине тока в этой фазе. Величина тока в поврежденной фазе меньше, чем в «здоровых» фазах. Зависимости токов в «здоровых»  $I_{3д}$  и поврежденной  $I_{повр}$  фазах от количества параллельных ветвей обмотки статора при обрыве одной из этих ветвей в одной фазе приведены на рис.4 и также могут использоваться при постановке диагноза о техническом состоянии АД.

Сравнение результатов экспериментальных исследований [2] и математического моделирования установившихся режимов работы опытного АД при наличии в нем дефектов показала, что при обрыве стержней КЗР отклонение величины коэффициента ОП по току  $K_{2l}$  не превышает 10,4 %, а отклонение отношения  $P/S$  – 6,8 %. Отклонение величины коэффициента ОП по току  $K_{2l}$  при витковых замыканиях в обмотке статора не превышает 10 %. Полученные результаты подтверждают адекватность использованных математических моделей, а также возможность построения принципов диагностики с их использованием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гашимов М.А. Логические методы диагностики технического состояния электрических машин // Электричество. – 1999. - № 7. – С.20-26.
2. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Экспериментальные исследования установившихся режимов работы асинхронных электродвигателей при наличии в них дефектов // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 17. – Донецк: ДонГТУ. – 2000. –С. 110-114.
3. Нури Абделбассет. Диагностика короткозамкнутых роторов асинхронных электроприводов электротехнических комплексов: Дис... канд. техн. наук: 05.09.03. – Донецк, 1997. - 135 с.
4. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. Учебное пособие. - Донецк.: ДПИ, 1979. - 110 с.
5. Гашимов М.А., Аскеров Н.А. Выявление неисправности стержней ротора асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1984. - № 8. - С. 60-66.
6. Ипатов П.М., Домбровский В.В., Цирлин Ю.Л. Витковые замыкания в петлевых обмотках асинхронных машин // Вестник электропромышленности. – 1962. - № 7. – С. 36-43.

***MATHEMATICAL MODELING OF ESTABLISHING WORK ROUTINES OF  
ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS ATTACHED TO PRESENCE IN  
THEM DEFECTS***

*D. Polkovnichenko*