

УДК 621. 311

**В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО<sup>1</sup>** (д-р техн.наук, проф.),  
**Д.И. КУЗЬМЕНКО<sup>2</sup>** (канд.техн.наук), **С.П. ЯРЕМЕНКО<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет

<sup>2</sup>Восточно-украинский национальный университет им. В. Даля

## ДИАГНОСТИКА СТЕРЖНЕЙ ДВУХКЛЕТЧНЫХ И ГЛУБОКОПАЗНЫХ КОРТКОЗАМКНУТЫХ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Выполнено моделирование асинхронных двигателей с глубокопазными и двухклеточными короткозамкнутыми роторами на математической модели, основанной на использовании полных дифференциальных уравнений обмоток статора и ротора. Проведены исследования входных параметров двигателя в пусковых и рабочих режимах при наличии поврежденных стержней в короткозамкнутой обмотке. Предложен наиболее информативный параметр для определения состояния стержней в обмотке ротора.*

**Введение.** Асинхронные двигатели (АД) широко применяются в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. На их долю приходится более 50% потребления вырабатываемой электрической энергии. По данным многочисленных авторов количество ежегодно повреждаемых АД составляет порядка 20-25 % от общего числа эксплуатируемых двигателей, что приводит к появлению значительных затрат на ремонт или замену поврежденных АД, а также возникновению ущерба от нарушения технологического процесса.

Главными причинами повреждаемости обмоток статора и ротора являются: несимметрия и несинусоидальность питающего напряжения; перегрев обмоток из-за неисправностей в системе охлаждения; неисправности механической части, приводящие к появлению эксцентриситета ротора и др.

Указанные неисправности приводят к ускоренному износу изоляции, механической части, увеличению потерь мощности и ухудшению технико-экономических показателей и, как следствие, к последующему возникновению аварийных повреждений.

Вопросам диагностики АД, и в частности выявлению поврежденных стержней короткозамкнутого ротора (КР), посвящено большое количество работ [1-3 и др.], которые направлены на своевременный вывод в ремонт АД с целью устранения возникших неисправностей.

К одному из наиболее сложных вопросов диагностирования относится контроль состояния стержней КР. Обрыв стержней обмотки ротора при несвоевременном его обнаружении может приводить к электромеханическим повреждениям обмотки статора и возникновению необходимости капитального ремонта.

В [4, 5] предлагается диагностировать стержни ротора на основе амплитудно-частотного спектра токов статора в результате их частотного преобразования в ряд Фурье. В [6] предложено использование опыта короткого замыкания для выявления пульсаций в обобщенном токе статора. В [7, 8] предложено использовать диагностические кривые, полученные методом математического моделирования и сравнения их с результатами контроля нагрузочных параметров АД. Известно так же [9], применение для диагностирования роторов регистрации вибраций с последующим выделением из ряда Фурье соответствующих гармоник.

Однако следует отметить то, что в указанных работах недостаточно внимания уделяется методам диагностирования роторов АД с глубокими пазами и двойной белочкой клеткой.

**Цель работы.** Математическое моделирование режимов работы АД с глубокопазным и двухклеточным ротором и выявление наиболее информативных параметров для диагностики.

**Материал и результаты исследований.** Рассмотрим метод построения математической модели АД с глубокопазным ротором. Будем считать известными каталожные данные двигателя: номинальные мощность  $P_{ном}$ , ток  $I_{ном}$ , напряжение  $U_{ном}$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , коэффициент полезного действия  $\eta$ , частоту вращения ротора  $n_{ном}$ , а также кратность пускового тока  $I_{п}/I_{ном}$ , пускового момента  $M_{п}/M_{ном}$  максимального момента  $M_{макс}/M_{ном}$ .

Глубокопазный ротор представим в виде эквивалентного двухклеточного, параметры схемы замещения которого найдем по методу, изложенному в [10].

Задав начальные параметры схемы замещения статора и ротора  $Z=[R_s, X_{\sigma s}, X_m, R_{r1}, R_{r2}, X_{\sigma r1}, X_{\sigma r2}]$ , уточним их значения методом минимизации суммы квадратов отклонений исходных (каталожных) и рассчитанных с помощью функции  $f(Z, s)$  по схеме замещения токов, вращающих моментов для скольжений номинального, критического и равного единице.

Вектор неизвестных параметров  $Z$  находим из решения следующей системы нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} I_{ном} - f(R_s, X_{\sigma s}, R_{r1}, R_{r2}, X_{\sigma r1}, X_{\sigma r2}, X_m, S = S_n) = 0 \\ I_{пуск} - f(R_s, X_{\sigma s}, R_{r1}, R_{r2}, X_{\sigma r1}, X_{\sigma r2}, X_m, S = 1) = 0 \\ M_{пуск} - f(R_s, X_{\sigma s}, R_{r1}, R_{r2}, X_{\sigma r1}, X_{\sigma r2}, X_m, S = 1) = 0 \\ M_{макс} - f(R_s, X_{\sigma s}, R_{r1}, R_{r2}, X_{\sigma r1}, X_{\sigma r2}, X_m, Z_m) = 0 \\ M_{ном} - f(R_s, X_{\sigma s}, R_{r1}, R_{r2}, X_{\sigma r1}, X_{\sigma r2}, X_m, S = S_n) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

В качестве примера по указанным данным приведем результаты определения параметров схемы замещения для АД типа *ВАН(АВ) 17-49-16* с каталожными данными:  $P_{ном} = 1600$  кВт,  $I_{ном} = 204$  А,  $U_{ном} = 6000$  В,  $\cos\phi_{ном} = 0,798$ ,  $\eta = 0,946$ ,  $n_{ном} = 372$  об/мин,  $I_{п} = 5,2$  о.е.,  $M_{макс}/M_{ном} = 2,5$  о.е.,  $M_{п}/M_{ном} = 0,9$  о.е..

Из решения системы уравнений (1) определены в относительных единицах  $R_s = 0,016$ ,  $X\sigma_s = 0,096$ ,  $Rr1 = 0,0098$ ,  $X\sigma r1 = 0,151$ ,  $Rr2 = 0,159$ ,  $X\sigma r2 = 0,207$ ,  $X_m = 1,893$ . Рассчитанные по указанным параметрам характеристики вращающего момента и пускового тока статора приведены на рис. 1. Их значения совпали с каталожными данными.

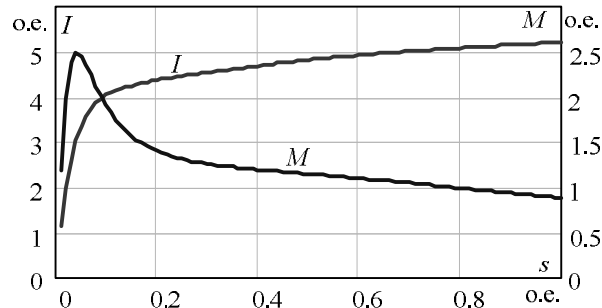


Рисунок 1 - Характеристики вращающего момента и пускового тока статора для двигателя *ВАН 17-49-16*

При анализе режимов работы асинхронного двигателя с двухклеточным короткозамкнутым ротором параметры его схемы замещения будем определять также по каталожным данным, с учетом данных о параметрах пусковых и рабочих обмоток ротора. В связи с тем, что для целей диагностики предполагается использование мгновенных значений режимных параметров АД (токов, напряжений, мощностей статора и частоты вращения ротора) будем использовать математическую модель АД, основанную на записанных в фазных координатах дифференциальных уравнениях трехфазного статора и многофазного ротора с количеством уравнений в последнем, равным числу стержней в верхней и нижней клетках.

$$\vec{p} \Psi_s = u_s - R_s i_s; \quad \vec{p} \Psi_{r1} = -R_{r1} i_{r1}; \quad \vec{p} \Psi_{r2} = -R_{r2} i_{r2};$$

$$p\omega = (M_e - M_c) \frac{1}{J}; \quad p\gamma = \omega; \quad M_e = \frac{3}{2} \vec{\Psi}_s \times \vec{I}_s;$$

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2)}; \quad U_s = \sqrt{\frac{2}{3}(u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2)};$$

$$u_{sa} = U_m \cdot \cos(\omega t); \quad u_{sb} = U_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \quad u_{sc} = U_m \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$\vec{I} = \left[ i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, i_{r1}^{(1)}, i_{r1}^{(2)}, \dots, i_{r1}^{(n)}, i_{r2}^{(1)}, i_{r2}^{(2)}, \dots, i_{r2}^{(n)} \right]^{tr}; \quad (2)$$

$$\vec{U} = [u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}, 0, 0, 0, \dots, 0]^{tr};$$

$$\vec{\Psi} = \left[ \psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}, \psi_{r1}^{(1)}, \psi_{r1}^{(2)}, \dots, \psi_{r1}^{(n)}, \psi_{r2}^{(1)}, \psi_{r2}^{(2)}, \dots, \psi_{r2}^{(n)} \right]^{tr};$$

$$R = \left[ R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}, R_{r1}^{(1)}, R_{r1}^{(2)}, \dots, R_{r1}^{(n)}, R_{r2}^{(1)}, R_{r2}^{(2)}, \dots, R_{r2}^{(n)} \right]^{tr}$$

$$P_s = (u_{sa} i_{sa} + u_{sb} i_{sb} + u_{sc} i_{sc}) \frac{2}{3}.$$

В этих уравнениях использованы активные сопротивления и индуктивности фазных обмоток статора и всех стержней ( $kfr$ ) каждой из обмоток ротора.

Вектор токов  $I$  определяем по потокосцеплениям, найденным из решения ДУ на каждом шаге расчета, с помощью блочной обратной матрицы собственных и взаимных индуктивностей  $L^{-1}(\gamma, \phi)$ , являющейся функцией угла положения ротора  $\gamma$  и угла между соседними стержнями ротора  $\phi$

$$I = L^{-1}(\gamma, \phi) \Psi; \quad \phi = \frac{2\pi}{kfr}; \quad L(\gamma, \phi) = \begin{bmatrix} L_s & L_{s-r1} & L_{s-r2} \\ L_{r1-s} & L_{r1} & L_{r1-r2} \\ L_{r2-s} & L_{r2-r1} & L_{r2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Аналитические выражения для формирования каждой из матриц входящих в (3), и способы формирования матрицы обратных индуктивностей изложены в [7]. Составленная по уравнениям(2) модель позволяет рассматривать режимы работы АД при различных значениях величины и частоты питающего напряжения, загрузки двигателя, а также учитывать функциональные зависимости момента сопротивления от частоты вращения ротора.

С помощью разработанной модели выполнено моделирование пуска двигателя ВАН (рис.2) с исправными стержнями ротора.

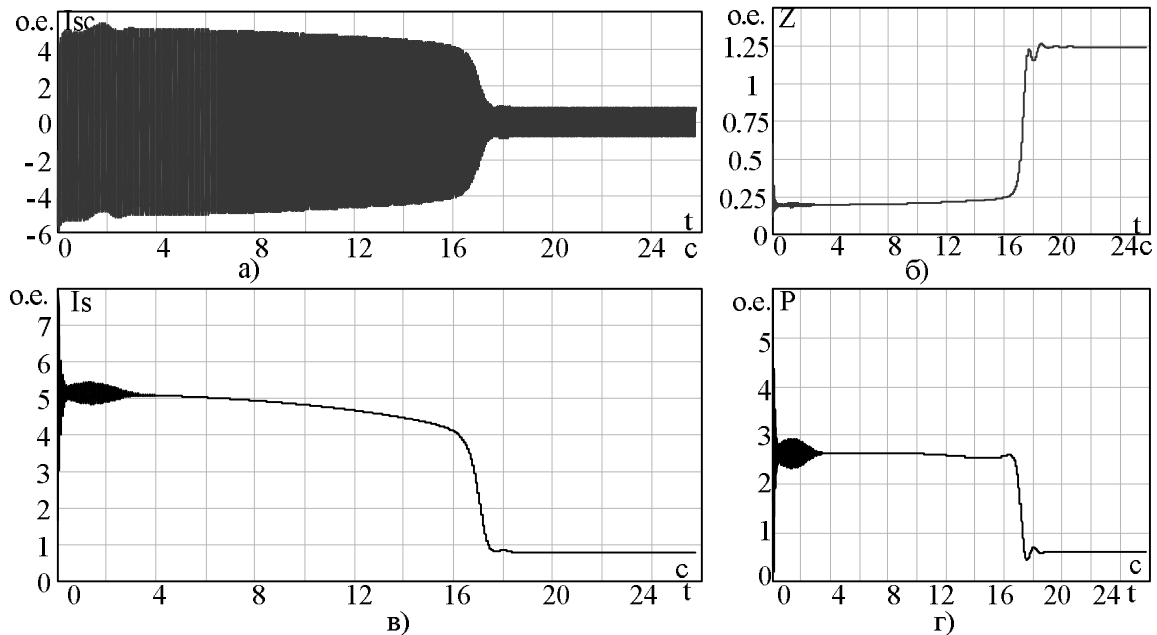


Рисунок 2 - Осциллограммы изменения тока фазы С статора (а), полного входного сопротивления (б), обобщенных векторов тока (в) и мощности (г) при пуске моделируемого АД при исправных стержнях ротора

Для выявления наиболее информативных параметров для диагностики воспользуемся описанной моделью, в которой будем полагать обрывы стержней путем увеличения сопротивлений одного или нескольких стержней верхней и нижней клеток ротора.

На рис.3 приведена одна из расчетных диаграмм пускового и установившегося режимов при наличии повреждения в 11-м стержне нижней клетки ротора. Число стержней, в каждой клетке ротора, принималось равным 48.

Из сопоставления осциллограмм рис. 2 и 3 видно, что в осциллограммах активной мощности обобщенных векторов тока и напряжения статора, полного активного и индуктивного входных сопротивлений появляются пульсации, вызванные несимметрией роторных обмоток. Выражения для отмеченных выше диагностических параметров приведены ниже

$$P = u_{sa}i_{sa} + u_{sb}i_{sb} + u_{sc}i_{sc}; \quad U_s = \sqrt{\frac{2}{3}(u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2)}; \quad (4)$$

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2)}; \quad Z = \frac{U_s}{I_s};$$

$$R = \frac{P}{I_s^2}; \quad X = \sqrt{\left(\frac{U_s}{I_s}\right)^2 - R^2};$$

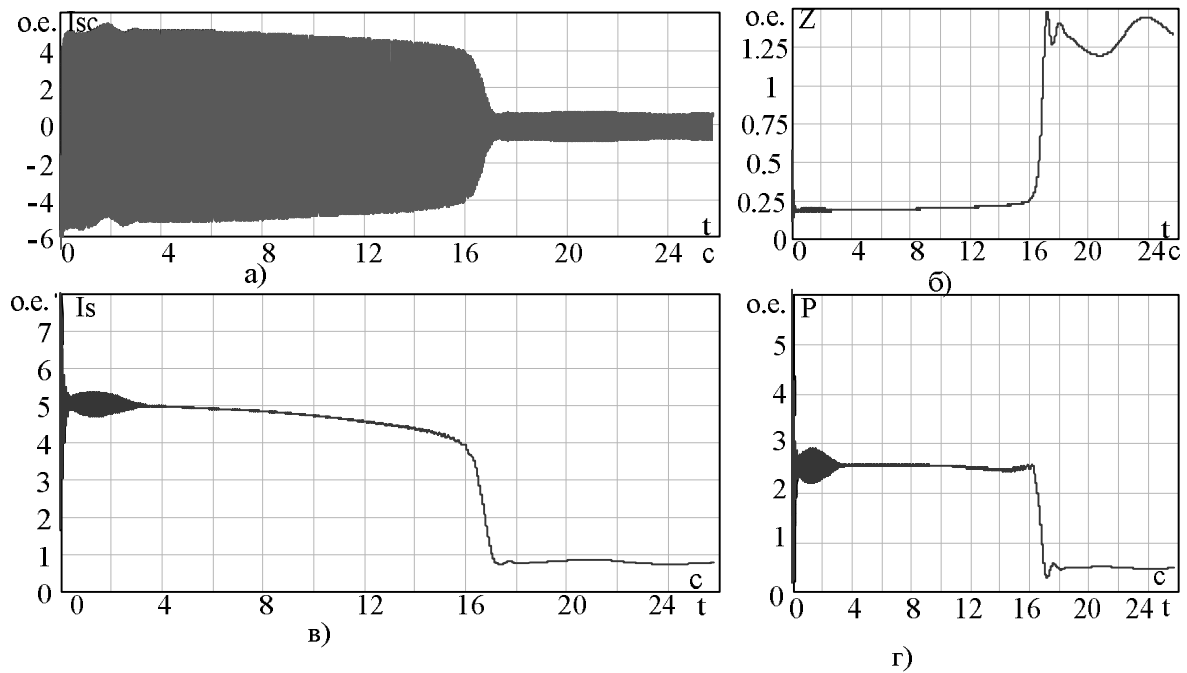


Рисунок 3 - Осциллограммы изменения тока статора (а), полного входного сопротивления (б), обобщенных векторов тока (в) и мощности (г) при пуске моделируемого АД при повреждении одного стержня ротора нижней клетки

С помощью разработанной модели возможно выявить наиболее информативные параметры.

По результатам моделирования установлено, что наиболее представительным для диагностики является использование отношения обобщенных векторов тока и напряжения к мгновенной электромагнитной мощности. С использованием указанного для диагностики введем  $\lambda$ -критерий измеряемый по мгновенным значениям фазных токов и напряжений

$$\lambda = \frac{\frac{4}{9}(u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2)(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2)}{(u_{sa}i_{sa} + u_{sb}i_{sb} + u_{sc}i_{sc})^2} - 1 = \frac{(UI)^2}{P^2} - 1.$$

Физический смысл этого критерия заключается в том, что мы используем пульсации полной и активной мощности, которые являются энергетическими характеристиками объекта и в наиболее полной мере характеризует нарушение симметрии.

На основании результатов исследования можно рекомендовать для двигателей, находящейся в эксплуатации с помощью, рассмотренной в данной работе математической модели получить зависимости критерия диагностики  $\lambda$  (рис.4) в функции от количества поврежденных стержней.

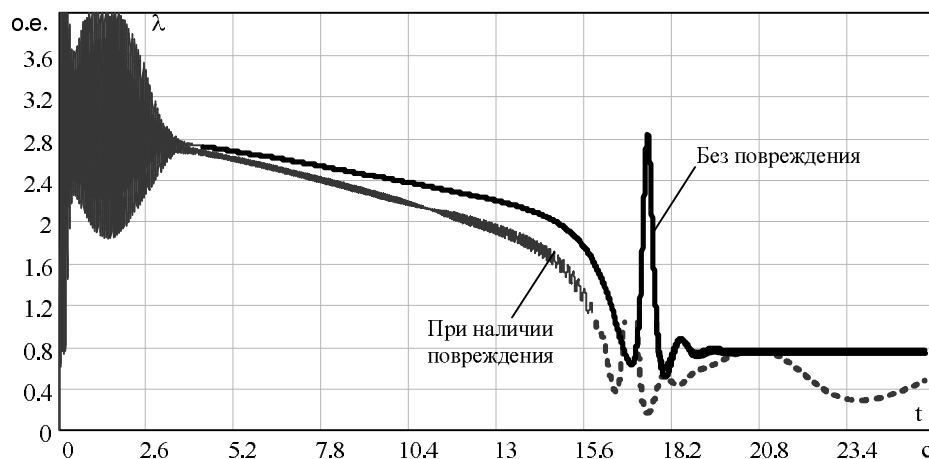


Рисунок 4 - Осциллограммы изменения  $\lambda$ -критерия при пуске и в установившемся режиме моделируемого АД при повреждении одного стержня ротора нижней клетки

Периодически измеряя мгновенные значения фазных токов и напряжений в рабочих режимах, можно определять экспериментальные значения критерия  $\lambda$  и проводить оценку состояния стержней ротора.

#### Выводы.

1. Разработанная математическая модель двухклеточного и глубокопазного асинхронного двигателя для выявления поврежденных стержней в обмотке ротора. В основу модели положены полные дифференциальные уравнения для статора и короткозамкнутых стержней ротора.

2. Исследован режим работы асинхронного двигателя с поврежденными стержнями в обмотке ротора и выявлен критерий диагностирования  $\lambda$ , равный отношению произведения обобщенных векторов тока и напряжения к мгновенной электромагнитной мощности.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Гашимов М.А. Диагностирование эксцентриситета и обрыва стержней ротора в асинхронных электродвигателях без их отключения / М.А. Гашимов, Г.А. Гаджиев // Электротехника. - 1998. - №10. - С. 46-51.

2. M. E. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys. Induction motor's faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques / IEEE Transactions on power electronics. - 1999. - № 1. - P. 14 - 22.

3. W. T. Thomson, M. Fenger. Current signature analysis to detect induction motor faults / IEEE Industry Application Magazine. Vol 7, No 4, July/August, 2001, P. 26 - 34.

4. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости электротехники. - 2005. - № 1(31). - С. 50-52.

5. Neelam Mehala, Ratna Dahiya. Motor current signature analysis and its applications in induction motor fault diagnosis. International journal of systems applications, engineering & development. - 2007. - № 1. - pp 29 - 35.

6. Сивокобыленко В.Ф. Диагностика асинхронных машин с короткозамкнутым ротором / В.Ф. Сивокобыленко, Нури Абделбассет // Электричество. - 1997. - № 3. - С. 25-27.

7. Математическое моделирование асинхронных двигателей при повреждениях стержней короткозамкнутого ротора / В.Ф. Сивокобыленко, В.А. Павлюков, Р.П. Сердюков В.И. Бондаренко С.П. Яременко // Наукові праці Донецького національного технічного університету . - 2009. - № 9(158). - С.222-226.

8. Новожилов А.Н. Метод численного моделирования работы асинхронного двигателя с обрывом стержней в короткозамкнутом роторе / А.Н. Новожилов, А.П.Кислов, О.А. Андреева // Электричество. - 2004. - № 11. - С. 41-45.

9. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика / В.А. Русов. - Пермь: ВПФ "Вибро-центр", 1996. - Вып 1. - 196 с.

10. Сивокобыленко В.Ф. Параметры и схемы замещения асинхронных двигателей с вытеснением тока в роторе / В.Ф. Сивокобыленко, В. А. Павлюков // Электрические станции. - 1976. - №2. - С. 51 - 54.

Надійшла до редколегії 11.12.2010

Рецензент: Г.Г. Рогозін

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО<sup>1</sup>, Д.І. КУЗЬМЕНКО<sup>2</sup>,  
С.П. ЯРЕМЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донецький національний технічний університет

<sup>2</sup> Східноукраїнський національний університет  
ім. В. Даля

V. SIVOKOBYLENKO<sup>1</sup>, D. KUZMENKO<sup>2</sup>,  
S. YAREMENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Donetsk National Technical University

<sup>2</sup> East Ukrainian National University named by V. Dal

**Діагностика стрижнів двохклітинних і глибокопазних короткозамкнених роторів асинхронних двигунів.** Виконано моделювання асинхронних двигунів з глибокопазними і двохклітинними короткозамкненими роторами на математичній моделі, яка заснована на використанні повних диференціальних рівнянь обмоток статора і ротора. Проведені дослідження входних параметрів двигуна в пускових і робочих режимах при наявності пошкоджених стрижнів в короткозамкненій обмотці. Запропонований найбільш інформативний параметр для визначення стану стрижнів в обмотці ротора.

**Diagnosis of Rotor Bars of Two-Cage and Squirrel Cage Induction Motors with Deep Slots.** We carried out the design of asynchronous machines with deep slots and two-cage squirrel caged rotors using of a mathematical model based on complete differential equations of stator and rotor windings. Researches into input parameters of the machine in starting and in working modes, when the rotor bars of a short-circuited winding are damaged, are conducted. The most informing parameter for estimating the state of rotor winding bars is offered.