

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО РЕЖИМА

Сивокобыленко В. Ф., Полковниченко Д. В.

Донецкий национальный технический университет  
svf@elf.dgtu.donetsk.ua

*The methodic for defining the symmetrical constitutive of the currents and voltages at the treating the experimental data for diagnostics of the technical state of the asynchronous motor.*

В работах [1,2] предлагается диагностирование технического состояния асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором (КЗР) выполнять на основе распознавания причин несимметрии параметров рабочего режима электродвигателя. Заключение о причинах возникновения несимметрии параметров рабочего режима электродвигателя делается на основе анализа величины и частоты симметричных составляющих токов и напряжений. Таким образом, достоверность постановки диагноза о техническом состоянии электродвигателя зависит от точности определения симметричных составляющих по результатам контроля мгновенных значений токов и напряжений.

При повреждении стержней КЗР АД ток статора можно представить состоящим из двух составляющих. Первая из них имеет частоту питающей сети  $f_1$ , а вторая – частоту  $f_2$ , которая определяется по выражению

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

где  $s$  – скольжение электродвигателя.

Замыкаясь через сеть и накладываясь на ток статора частоты  $f_1$ , ток обратной последовательности (ОП) частоты  $f_2$  вызывает пульсации фазного тока статора электродвигателя (рис.1). Таким образом, фазный ток статора электродвигателя можно записать в виде

$$i_a = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_{2m} \sin(\omega t(1 - 2s) + \varphi_2),$$

где  $I_{1m}, I_{2m}$  – амплитуды составляющих тока соответственно прямой последовательности (ПП) и ОП;

$\varphi_1, \varphi_2$  – начальные фазы составляющих тока соответственно ПП и ОП.

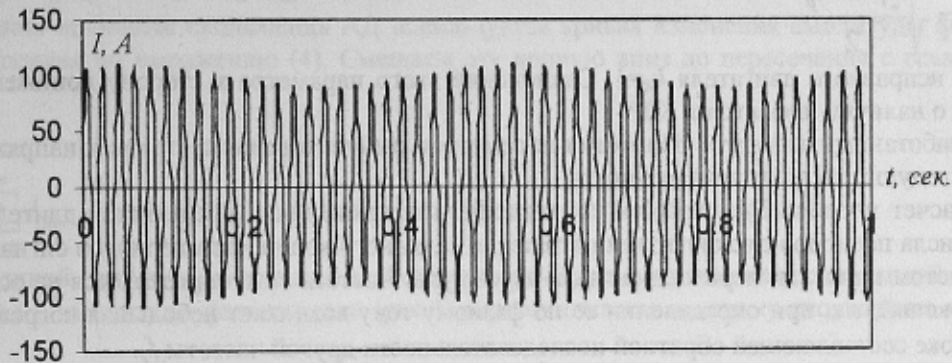


Рисунок 1 – Фазный ток электродвигателя при наличии поврежденный КЗР

Как в работах отечественных авторов [3,4], так и зарубежных [5], показано, что наиболее эффективными сигналами для целей диагностики стержней КЗР являются спектральные линии тока одной из фаз при частотах  $(1 \pm 2s)f_1$ .

Однако при практическом использовании такого подхода возникают трудности при выделении симметричных составляющих ПП и ОП по параметрам рабочего режима электродвигателя. Эти трудности связаны с наличием в токе статора гармоник выше первой, непостоянством величины скольжения во времени и трудностью его измерения, отклонением частоты питающего напряжения от номинального.

В данной работе предлагается оценку состояния ротора АД производить, используя коэффициент несимметрии токов

$$k_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1}, \tag{1}$$

где  $I_1, I_2$  – действующие или амплитудные значения токов соответственно ПП и ОП.

Коэффициент несимметрии токов  $k_i$  определяется по осциллограммам мгновенных значений фазных токов в нагрузочных режимах электродвигателя. При цифровой регистрации токов удовлетворительная точность имеет место при частотах их фиксации порядка  $(20 \div 30)f_i$ . Время контроля должно быть не менее

$$t_{\text{контроля}} \geq \frac{k_s}{s_{\text{ном}} \cdot \frac{P}{P_{\text{ном}}}}, \text{ сек.},$$

где  $k_s = 1,5 \div 2,5$  – коэффициент запаса;

$s_{\text{ном}}$  – номинальное скольжение АД, %;

$P_{\text{ном}}, P$  – значения потребляемой АД активной мощности соответственно номинальное и определяемое по результатам эксперимента.

С целью уменьшения влияния отмеченных выше факторов на точность выделения симметричных составляющих токов предлагается использовать метод наименьших квадратов для определения эффективных значений токов, соответствующих каждому дискретному моменту времени фиксации фазных токов.

Кроме того, в данной работе предложено скольжение АД находить из осциллограмм фазных токов, а упомянутый выше критерий (1) дополнить еще одним – критерием наклона характеристики  $k_p$ , характеризующим крутизну механической характеристики АД в области рабочих скольжений. Так как при наличии оборванных стержней КЗР скольжение  $s$  АД увеличивается при той же величине нагрузки, то указанное отношение будет уменьшаться по сравнению с его значением для исправного двигателя. Такой же характер изменения крутизны указанной характеристики будет иметь место и при понижении напряжения. Поэтому вводится коррекция предлагаемого критерия с учетом квадрата отношения номинального напряжения и напряжения статора в опыте. В относительных единицах выражение для критерия наклона характеристики имеет вид

$$k_p = \left(\frac{P}{P_{\text{ном}}}\right) \cdot \left(\frac{s}{s_{\text{ном}}}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{U_{\text{ном}}}{U}\right)^2, \quad (2)$$

где  $s, U$  – определяемые по результатам эксперимента значения соответственно скольжения и напряжения статора;

$U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение статора.

Обобщенный параметр диагностирования АД с КЗР – коэффициент его исправного состояния будет определяться как

$$k_d = \sqrt{\frac{k_i^2 + k_p^2}{2}}. \quad (3)$$

Для исправного двигателя  $k_d=1$ . Отклонение этого параметра в сторону понижения от единицы свидетельствует о наличии дефектов в КЗР.

Разработанный алгоритм обработки параметров рабочего режима (токов и напряжений) электродвигателя имеет следующую последовательность:

1. Расчет периода  $T_1$  и частоты  $f_1$  питающего напряжения. Определяется длительность времени путем подсчета числа периодов дискретизации в течение заданного количества периодов сигнала, которая затем уточняется с учетом поправки перехода сигнала через нуль. Частота сети определяется на основании контроля фазных напряжений, т.к. при определении ее по фазному току возникает небольшая погрешность, связанная с наличием в токе составляющей обратной последовательности другой частоты  $f_2$ .

2. Определение начальной фазы фазных токов электродвигателя. Для этого сначала определяется момент первого перехода тока через нуль, согласно рис.2, по выражению

$$t_x = t + \Delta t_x = t + \frac{|i_i| \Delta t}{|i_i| + |i_{i+1}|}, \text{ сек.},$$

где  $\Delta t$  – период дискретизации, сек.

Начальная фаза тока в секундах и радианах определяется соответственно по выражениям:

$$t_0 = \frac{T_1}{2} - t_x, \text{ сек.};$$

$$\varphi_0 = \frac{2\pi t_0}{T_1}, \text{ рад.}$$

3. Определение амплитуды фазных токов в каждый момент времени их фиксации. Выполняется на основе определения среднеквадратического значения тока для количества дискретных точек, соответствующих периоду сигнала номиналь-

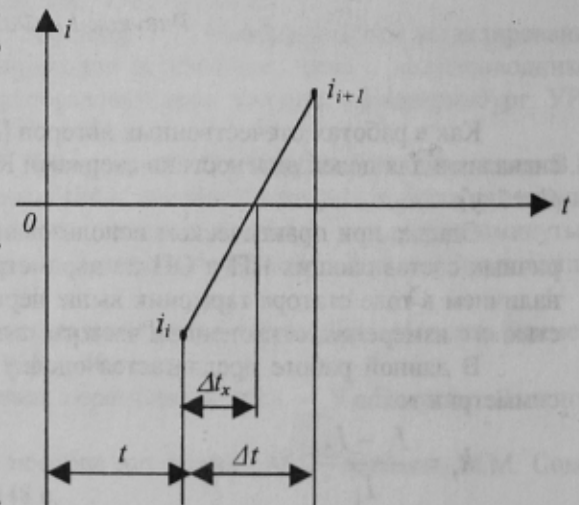


Рисунок 2 – К определению начальной фазы токов

ной частоты и взятых слева и справа от текущей  $i$ -той точки:

$$I_{mi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=-10}^{10} i^2}{\sum_{i=-10}^{10} \sin^2(2\pi \cdot f_1 \cdot t_i + \varphi_0)}} \quad (4)$$

4. Определение векторов фазных токов, соответствующих каждому моменту времени фиксации мгновенных значений фазных токов электродвигателя:

$$\bar{I}_i = I_{mi} \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t_i + \varphi_0) + jI_{mi} \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t_i + \varphi_0).$$

5. По значениям векторов фазных токов электродвигателя, рассчитываются симметричные составляющие ПП  $\bar{I}_{1i}$  и ОП  $\bar{I}_{2i}$  для каждого момента времени  $t_i$ :

$$\bar{I}_{1i} = \frac{1}{3}(\bar{I}_{ai} + a\bar{I}_{bi} + a^2\bar{I}_{ci});$$

$$\bar{I}_{2i} = \frac{1}{3}(\bar{I}_{ai} + a^2\bar{I}_{bi} + a\bar{I}_{ci}).$$

6. Амплитуды составляющих тока ПП  $I_{1m}$  и ОП  $I_{2m}$  за полное время контроля определяются по выражениям:

$$I_{1m} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n i_{1i}^2};$$

$$I_{2m} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n i_{2i}^2},$$

где  $i_{1i} = \text{real}(\bar{I}_{1i})$ ,  $i_{2i} = \text{real}(\bar{I}_{2i})$  – мгновенные значения составляющих тока соответственно ПП и ОП.

7. По выражению (1) рассчитывается коэффициент несимметрии фазных токов АД  $k_i$ .

8. Величина потребляемой электродвигателем активной мощности  $P$  определяется на основании контроля фазных токов и фазных или линейных напряжений по выражению:

$$P = i_a \cdot u_a + i_b \cdot u_b + i_c \cdot u_c \quad \text{или} \quad P = i_a \cdot u_{ab} + i_c \cdot u_{cb}.$$

9. Для определения величины скольжения АД используется кривая изменения амплитуды фазного тока во времени  $I_{mi}(t)$ , найденная по выражению (4). Смещаем эту кривую вниз до пересечения с осью времени  $t$  (рис.3):

$$I_{xi} = I_{mi} - I_{m.c.p.},$$

где  $I_{m.c.p.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{mi}$  – среднее значение амплитуды фазного тока электродвигателя.

Пользуясь методикой определения периода и частоты питающего напряжения, приведенной в п.1, находим период колебаний  $t_{кол}$  амплитуды фазного тока (рис.3) и рассчитываем величину скольжения  $s$  АД по выражению:

$$s = \frac{1}{t_{кол}}, \% \quad (5)$$

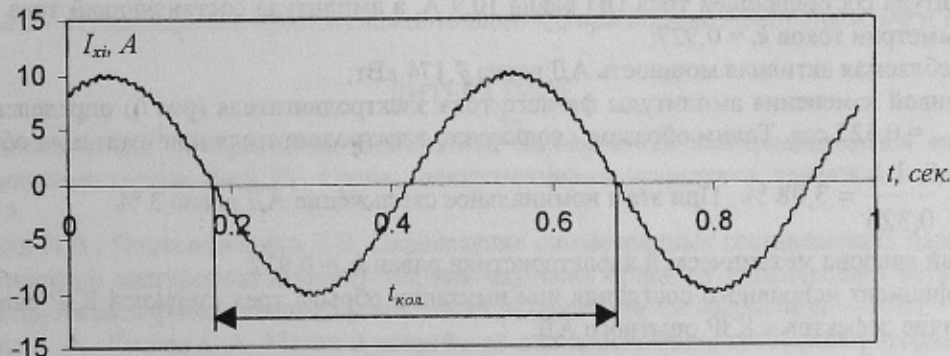


Рисунок 3 – К определению периода колебаний амплитуды фазного тока электродвигателя

10. По выражению (2) определяется критерий наклона механической характеристики АД  $k_p$ .  
 11. Определяется обобщенный диагностический параметр  $k_3$  по выражению (3).

Скольжение АД при обрыве стержней КЗР и амплитуду составляющей тока ОП можно найти также по более простой методике. Для этого необходимо найти значения модуля обобщенного вектора тока статора АД  $i_s$  в каждый момент времени контроля фазных токов по выражению:

$$i_s = \sqrt{\frac{2}{3}(i_{ai}^2 + i_{bi}^2 + i_{ci}^2)}.$$

Затем из зависимости обобщенного вектора тока статора выделяются его постоянная  $i_{s,cp}$  и переменная  $i_{s,0}$  составляющие, представляющие собой соответственно токи ПП и ОП

$$i_{s,cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i_{si}; \quad i_{s0i} = i_{si} - i_{s,cp}.$$

Используя период колебаний зависимости  $i_{s0}(t)$ , по выражению (5) определяется скольжение АД, а амплитуда этой зависимости является амплитудой составляющей тока ОП.

Далее приведен пример применения разработанной методики для обработки параметров рабочего режима опытного АД 0,4 кВ типа 4А132М6У3 мощностью 7,5 кВт при имитации обрыва трех стержней КЗР.

На рис.4 приведена осциллограмма мгновенных значений фазного тока электродвигателя, фиксация которых проводилась с частотой дискретизации 1000 Гц.

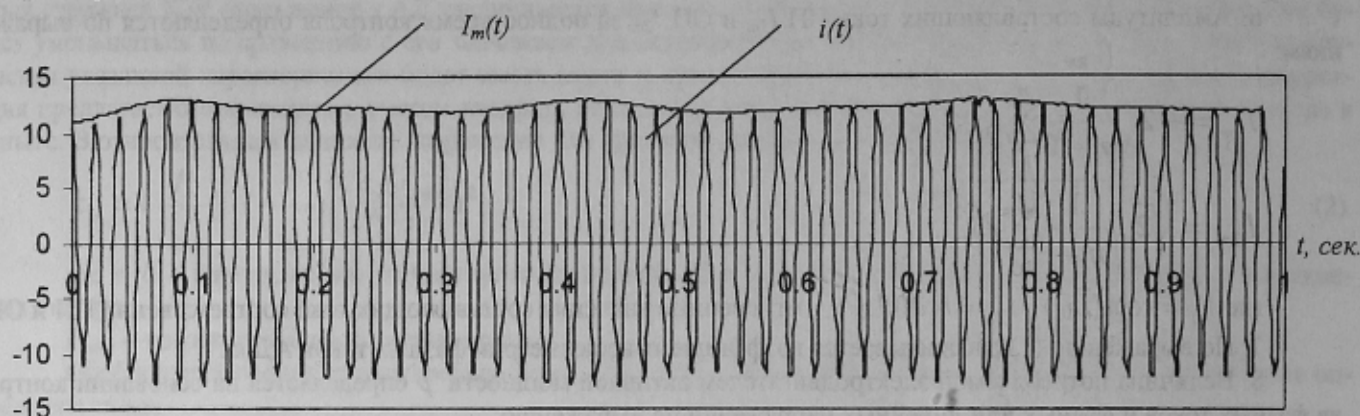


Рисунок 4 - Осциллограмма фазного тока опытного АД  $i(t)$  и расчетная зависимость амплитуд фазного тока  $I_m(t)$

В ходе обработки фазных токов электродвигателя были получены следующие результаты, практически совпадающие по обоим методикам:

- частота питающего напряжения равна  $f_1 = 49,62$  Гц;
- начальные фазы фазных токов электродвигателя  $\varphi_{0a} = 1,737$  рад.;  $\varphi_{0b} = 5,989$  рад.;  $\varphi_{0c} = 3,881$  рад.;
- определены амплитуды фазных токов АД в каждый дискретный момент времени. Расчетная зависимость амплитуд фазного тока  $I_m(t)$  приведена на рис.4;
- по величине  $I_m$  с учетом начальной фазы  $\varphi_0$  рассчитаны вектора фазных токов в каждый момент времени фиксации;
- на рис.5 приведены выделенные составляющие тока статора АД ПП и ОП;
- амплитуда составляющей тока ПП равна 10,9 А, а амплитуда составляющей тока ОП – 0,79 А; коэффициент несимметрии токов  $k_t = 0,927$ ;
- потребляемая активная мощность АД равна 7,174 кВт;
- по кривой изменения амплитуды фазного тока электродвигателя (рис.6) определен период ее колебаний, равный  $t_{кол} = 0,325$  сек. Таким образом, скольжение электродвигателя при имитации обрыва трех стержней КЗР равно  $s = \frac{1}{0,325} = 3,08$  %. При этом номинальное скольжение АД равно 3 %.

Критерий наклона механической характеристики равен  $k_p = 0,932$ ;

и) коэффициент исправного состояния при имитации обрыва трех стержней КЗР равен  $k_d = 0,93$ , что указывает на наличие дефектов в КЗР опытного АД.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан алгоритм обработки параметров рабочего режима АД с КЗР, позволяющий выделять симметричные составляющие токов и напряжений и использовать их для диагностики технического состояния электродвигателя. Алгоритм позволяет минимизировать погрешности расчета, связанные с наличием в токе

статора гармоник выше первой, непостоянством величины скольжения во времени и трудностью его измерения, отклонением частоты питающего напряжения от номинального.

2. Для повышения достоверности постановки диагноза, наряду с коэффициентом несимметрии фазных токов АД, предложено использовать дополнительный критерий наклона механической характеристики. Для этого разработана методика определения скольжения электродвигателя по периоду пульсаций фазного тока, что не требует установки специальных датчиков частоты вращения.

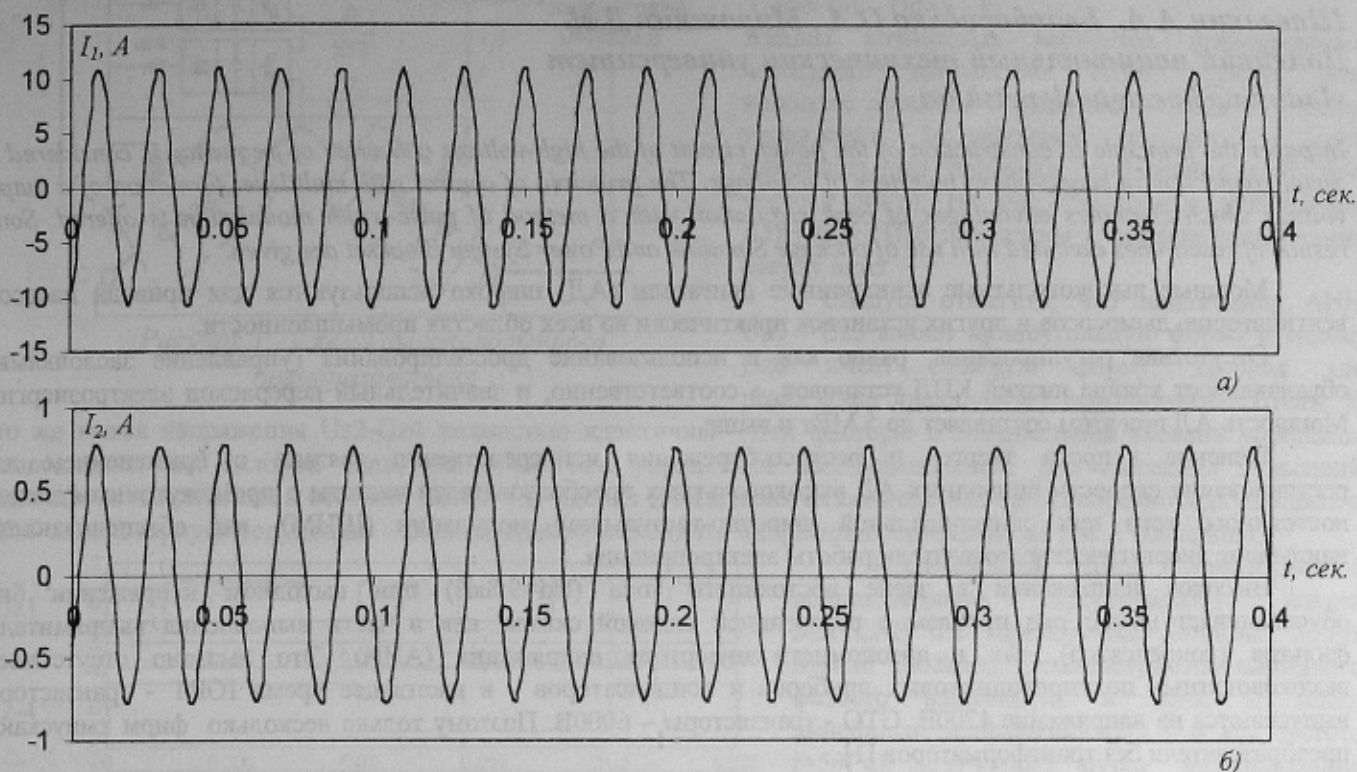


Рисунок 5 – Составляющие тока опытного АД при имитации обрыва трех стержней КЗР:  
а – III; б – ОП

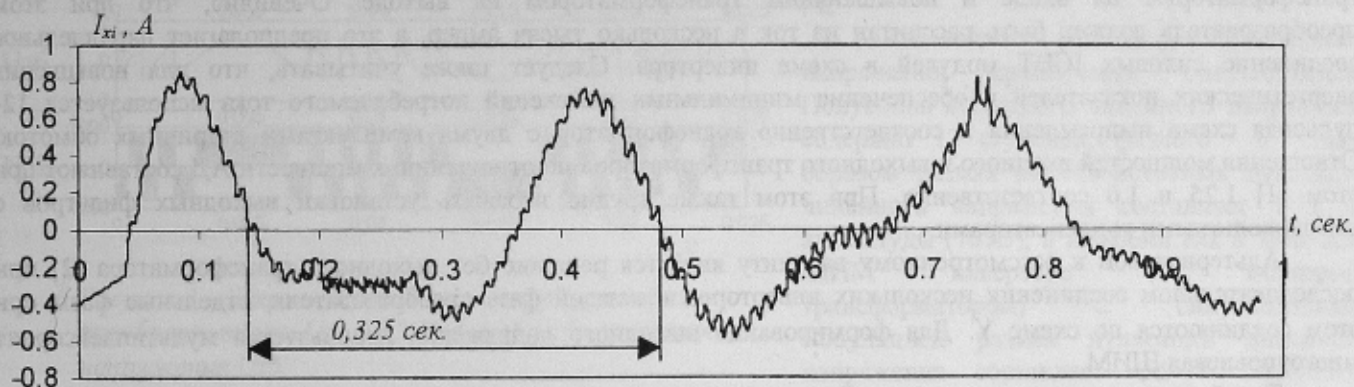


Рисунок 6 – К определению скольжения опытного АД при обрыве трех стержней КЗР

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полковниченко Д.В. Оперативная диагностика асинхронных электродвигателей собственных нужд ТЭС // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 4. – Донецк: ДонГТУ. – 1999. – С. 230-235.
2. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Определение симметричных составляющих параметров рабочего режима для диагностики электродвигателей // Збірник наукових праць IV Міжнародної наукової конференції "Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств". – Мариуполь. – 2000. – С. 183-186.
3. Брюханов Г.А., Князев С.А. Метод и устройство для диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1986. - № 2. – С. 44-45.
4. Сивокобыленко В.Ф., Гармаш В.С. Диагностика стержней ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя // Энергетика и электрификация. – 1994. - № 2. – С.18-20.
5. Bellini A., Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C. Towards a correct quantification of induction machines broken bars through input electric signals. International conference on electrical machines (ICEM-2000), Helsinki University of technology, Espoo, Finland, p.781-785.