

УДК 621.313.333.2

Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора

Н. Р. Сафин,

УрФУ, аспирант кафедры электротехники и электротехнологических систем

В. А. Прахт,

УрФУ, доцент кафедры электротехники и электротехнологических систем, кандидат технических наук

В. А. Дмитриевский,

УрФУ, доцент кафедры электротехники и электротехнологических систем, кандидат технических наук

А. А. Дмитриевский,

УрФУ, аспирант кафедры электротехники и электротехнологических систем

В. М. Казакбаев,

УрФУ, аспирант кафедры электротехники и электротехнологических систем

В статье рассматриваются вопросы диагностирования неисправностей асинхронных двигателей и влияния их на энергетические характеристики двигателей. Упреждающая диагностика асинхронных двигателей позволяет заблаговременно выявить неисправности на ранней стадии их развития, сохранить энергоэффективность работы машин, что даёт возможность придерживаться режима энергосбережения для предприятий и тем самым повышать технологическую надёжность и рентабельность.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, эксцентриситет, неисправности, диагностика неисправностей, энергосбережение, энергоэффективность.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором сегодня является основой большинства промышленных электроприводов. Однако их эффективному применению препятствует относительно высокая повреждаемость – около 25 % общего числа установленных электродвигателей ежегодно [1, 2]. При эксплуатации асинхронных двигателей возникают отклонения их параметров от номинальных значений, вызываемые технологическими погрешностями изготовления двигателя, неправильными режимами эксплуатации или износом во время эксплуатации [3].

Наиболее часто встречающимися неисправностями в асинхронных двигателях являются повреждения подшипников и повреждения элементов статора. Статистические данные по неисправностям двигателей с короткозамкнутым ротором говорят о том, что повреждения подшипников составляют 69 %, обмоток статора – 21 %, стержней ротора – 7 % и повреждения, связанные с соединительными муфтами силового агрегата, – 3 % [4].

Как правило, механические неисправности (повреждения подшипников) сопровождаются возникновением эксцентриситета ротора [5]. Под действием радиальной силы ось ротора смещается со своей первоначальной позиции, вызывая пульсацию усилия, в основном в радиальном направлении, и происходит изменение воздушного зазора между статором и ротором [6]. В этом случае воз-

никает повышенная вероятность задевания ротора о статор, что может привести к местному перегреву сердечников и пробоем изоляции [3]. При эксцентриситете ротора возрастает ток питания, ухудшаются технико-экономические характеристики двигателя, т. е. косвенные непродуктивные затраты электроэнергии, обусловленные повышенным электропотреблением (при той же полезной мощности) составляют до 5–7 %, при этом стоимость перерасхода электроэнергии за год может превысить стоимость самого двигателя [7–9, 13]. Так же при неравномерности воздушного зазора увеличиваются потери в стали (на 15–30 %), возрастают провалы в кривой момента и увеличивается время разгона машины [9].

Существуют следующие типы эксцентриситета ротора (рис. 1) [10]:

- смешанный, когда ось вращения ротора не совпадает ни с осью симметрии статора O_s , ни с собственной осью симметрии O_r (а);
- динамический, когда ось вращения ротора совпадает с осью симметрии статора O_s и не совпадает с собственной осью симметрии O_r (б);
- статический, когда ось вращения ротора совпадает с его осью симметрии O_r и не совпадает с осью симметрии статора O_s (в).

Диагностировать эксцентриситет ротора возможно посредством измерительного щупа, вибрационным способом с помощью вибродатчиков, емкостным

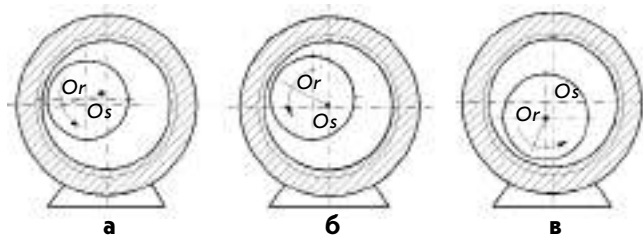


Рис. 1. Упрощенные поперечные сечения двигателя с эксцентриситетом ротора:

а – смешанным;
б – динамическим;
в – статическим

способом (при помощи конденсатора, обкладками которого являются электрод, расположенный в пазу статора электрической машины на уровне коронок зубцов, и поверхность ротора) и методом, основанным на спектральном анализе потребляемых токов статора. Наиболее распространенными из них являются методы, основанные на вибродиагностике и спектральном анализе потребляемых токов статора [7]. Последний имеет преимущество с точки зрения удаленного мониторинга, т. е. посредством доступа к электропитанию.

В асинхронном двигателе по потребляемому току могут быть обнаружены следующие неисправности [11]:

- повреждения электрической части ротора: обрывы и электрическая несимметрия обмотки ротора;
- повреждения электрической части статора: обрывы и электрическая несимметрия силовой обмотки;
- изменение формы воздушного зазора, включая статический и вращающийся (динамический) эксцентриситеты с возможностью идентификации случаев;
- недопустимый износ подшипников;
- неисправности источников питания, приводящие к искажению формы питающего напряжения.

В нагруженных на электродвигатель механизмах у агрегатов по потребляемому двигателем току могут быть обнаружены несоосность валов, соединяемых муфтами в линию вала, дефекты муфт (в том числе фрикционной или гидравлической); дефекты ременных, зубчатых и цепных передач; дефекты насаженных на вал рабочих узлов, таких как лопасти рабочих колес, эксцентрики (вместе с нагруженными на них клапанами и т. п.), поршни (вместе с цилиндрами цилиндро-поршневой группы) и т. д.; увеличенный момент сопротивления нагруженного на двигатель механизма [11].

Для исследования эксцентриситета ротора на основе спектрального анализа токов статора и оценки влияния данной неисправности на энергетические характеристики двигателя в качестве испытуемой машины был использован двигатель АИР 71 А2У2 ІМ1081 (номинальная мощность 0,75 кВт; номинальная скорость 2 820 об./мин). Испытания проводились в двух условиях: с заводским подшипником марки 6204

и с подшипником марки 6005 с втулкой (рис. 2 и 3). Размеры подшипников и втулки приведены ниже.

1. Подшипник марки 6204 (рис. 2): внутренний диаметр $d = 20$ мм; внешний диаметр $D = 47$ мм; ширина подшипника $B = 14$ мм;

2. Подшипник марки 6005 (рис. 2): внутренний диаметр $d = 25$ мм; внешний диаметр $D = 47$ мм; ширина подшипника $B = 12$ мм; внешний диаметр втулки 24,95 мм; внутренний диаметр втулки 20,05 мм (рис. 3 б).

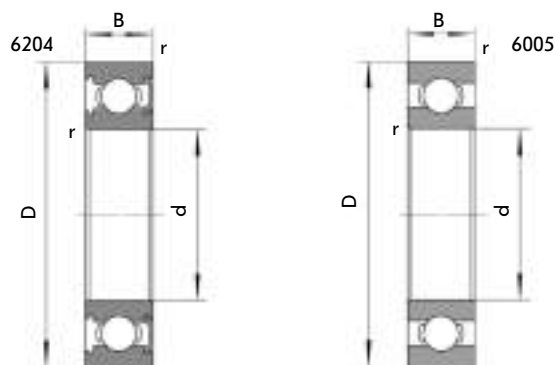


Рис. 2. Основные размеры подшипников марок 6204 и 6005

При работе асинхронного двигателя с подшипником 6005 с внутренней втулкой эксцентриситет ротора создается за счёт разницы посадок втулки подшипника к валу машины (диаметр вала 19 мм и внутренний диаметр втулки 20,05 мм). При этом когда двигатель работает, происходит циклическое изменение воздушного зазора по окружности ротора (т. е. смешанный эксцентриситет). Данный способ искусственного получения эксцентриситета ротора описан в некоторых зарубежных работах [12, 13]. Методика определения эксцентриситета ротора в асинхронном двигателе изложена в [9, 14]. Статистика эксцентриситетов ведётся не для всех машин, измерение воздушного зазора обычно производится с помощью щупов. Нормами допускается предельная величина эксцентриситета $\varepsilon = 0,15$ [9], однако расчёты и опытные данные показывают, что в ряде случаев эксцентриситет значительно больший.

Как правило, измерение воздушного зазора в машине осуществляют в четырёх точках по схеме «сверху-снизу» и «слева-справа» [7]. При испытаниях с изначальным подшипником 6204 (эксцентриситет ротора отсутствует) воздушный зазор составляет $\delta = 0,275$ мм. Далее вместо подшипника 6204 был установлен подшипник 6005 с внутренней втулкой (втулка применялась к одному из подшипников двигателя). В этом случае эксцентриситет ротора, как отмечено выше, создаётся за счёт разницы диаметров вала двигателя (19 мм) и внутреннего диаметра втулки (20,05 мм). В этом случае воздушный зазор составлял $\delta = 0,295$ мм (усреднённое значение, после четырёх точек). Следовательно, при этом, когда машина работает, мы имеем некоторое циклическое смещение ротора относительно статора машины.

Эксцентриситет ротора машины определяется относительной величиной $\varepsilon = (0 < \varepsilon < 1)$, которая равна [10]:

$$\varepsilon = \frac{\delta - \delta_{\min}}{\delta} = \frac{0,000295 - 0,000215}{0,000295} = 0,3, \quad (1)$$

где δ – значение воздушного зазора при эксцентриситете ротора, м;

δ_{\min} – минимальное значение воздушного зазора, м.

Величина эксцентриситета ротора превышает нормированное значение в два раза ($\varepsilon_1 = 0,15$ и $\varepsilon = 0,3$).

Испытания проводились на экспериментальном стенде. Нагрузочный момент создавался электромагнитным порошковым тормозом «Metrobel FAT 350» 35 Н·м, 3000 об./мин, для измерения момента использовался датчик момента TRD-3К (3 кгс·м), для измерения скорости – датчик частоты вращения МР-981, для соединения валов испытываемой машины с нагрузочным устройством – муфты марок VoWex M-19 и Ruflex 0-3TFx6-20. Электропитание двигателя производилось напрямую от трёхфазной сети. Для сопоставимости результатов эксперимента значения нагрузочных моментов задавались равными (2,64 Н·м) при обоих режимах (с исправным и неисправным подшипником). Ниже показан вид ротора и подшипников (рис. 3).

Запись мгновенных значений токов и напряжений выполнялась с помощью аналогово-цифрового пре-



а



б

Рис. 3. Ротор и подшипники асинхронного двигателя:

а – внешний вид ротора;
б – заводской подшипник и подшипник с внутренней втулкой

образователя USB3000 и измерительной платы с тремя датчиками токов LEM HX 02-P [15] и тремя датчиками напряжений LV25-P SP5 [16]. Полученные значения использовались для спектрального анализа в пакете Matlab на основе быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform).

При проведении испытаний мгновенные значения токов и напряжений оцифровывались и записывались на компьютер для дальнейшей обработки в Matlab. Исходя из полученного графика по потребляемому току можно отметить, что двигатель с повреждённым подшипником вызывает повышенный перерасход электроэнергии 65,74 Вт (рис. 4). Кроме того, среднеквадратическое действующее значение токов при обоих режимах составляет: в случае с исправным подшипником $I_1 = 2,1$ А; в случае с повреждённым подшипником $I_2 = 2,22$ А.



Рис. 4. Сравнительный график полученных токов при питании напрямую от сети:

1 – бездефектный асинхронный двигатель;
2 – с повреждённым подшипником

При сравнении полученных графиков (рис. 5 и 6) видны определённые различия, в частности, на рис. 5 среди спектрального состава выделяются частоты 150 Гц. На рис. 6 на этой частоте виден рост амплитуды до -80 дБ, что свидетельствует о наличии механической неисправности [8].

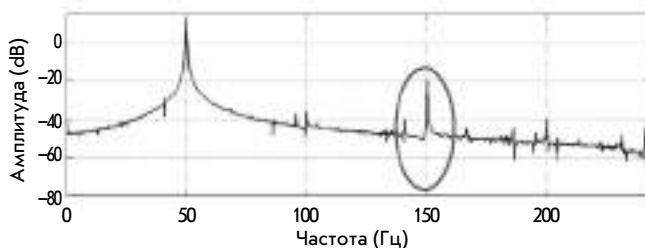


Рис. 5. Спектральный состав тока асинхронного двигателя с исправным подшипником при питании напрямую от сети

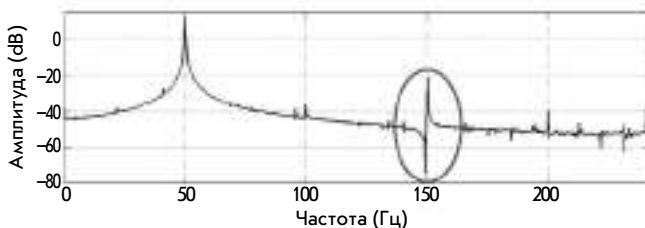


Рис. 6. Спектральный состав тока асинхронного двигателя с повреждённым подшипником при питании напрямую от сети

Как правило, при спектральном анализе токовых характеристик сравнивают увеличение количества частотных полос и рост их величины и определяют выделяющиеся характеристические частоты, которые соответствуют определённым видам повреждений. В данном случае амплитуды на 150 Гц являются относительно большими (рис. 6) по сравнению с графиком с исправным подшипником (рис. 5).

Ниже на рис. 7 приведён сравнительный спектр токов, исходя из которого можно отметить, что в случае с повреждённым подшипником (нижний график, рис. 7) имеется увеличение количества частотных полос и рост их величины (при значительном уровне сигналов в частотной области от -80 дБ, как показано прямой линией), что является признаком наличия неисправности – технологического эксцентриситета ротора [8].

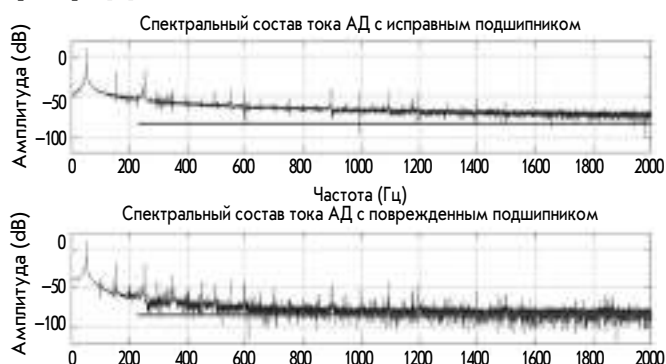


Рис. 7. Сравнительный вид полного спектра токов при питании напрямую от сети: асинхронный двигатель с исправным подшипником (верхний график); асинхронный двигатель с повреждённым подшипником (нижний график)

После испытаний полученные значения коэффициента полезного действия при питании двигателя от сети выглядят следующим образом: с исправным подшипником $\eta_1 = 0,61$; с повреждённым подшипником $\eta_2 = 0,59$. Полученное в эксперименте различие в КПД у исправного и с искусственной неисправностью двигателя ($\eta_1 - \eta_2 = 3,4\%$) показывает, что наличие технологического эксцентриситета ротора существенно снижает энергоэффективность работы асинхронного двигателя.

Проведём технико-экономический расчёт по определению возможных финансовых затрат для одного двигателя АИР 71 А2У2 ІМ1081 (номинальная мощность 0,75 кВт; номинальная скорость 2 820 об./мин).

1. Асинхронный двигатель с исправным подшипником.

Активная мощность на зажимах двигателя:

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_1} = \frac{750}{0,61} = 1230 \text{ Вт}, \quad (2)$$

где P_n – номинальная мощность двигателя, Вт;

η_1 – номинальное значение КПД при работе двигателя с исправным подшипником.

Суммарные потери:

$$\Delta P_1 = \Delta p_{\text{э1}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{э2}} + \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{д}} = P_1 - P_2 = 1230 - 750 = 480 \text{ Вт}, \quad (3)$$

где $\Delta p_{\text{э1}}$ – электрические потери в обмотке статора;
 $\Delta p_{\text{э2}}$ – электрические потери в обмотке ротора;
 $\Delta p_{\text{м}}$ – магнитные потери;
 $\Delta p_{\text{мех}}$ – механические потери;
 $\Delta p_{\text{д}}$ – добавочные потери.

Допустим, что данный двигатель работает 20 часов в сутки. Тогда суммарное количество потерь за год составит:

$$\Sigma W_1 = \Delta P_1 \cdot t_{20\text{ч}} \cdot n_{\text{д}} = 480 \cdot 20 \cdot 365 = 3\,504\,000 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3\,504 \text{ Вт}\cdot\text{ч}, \quad (4)$$

где $t_{20\text{ч}}$ – количество часов работы в сутки, ч;
 $n_{\text{д}}$ – количество дней в году.

2. В случае с повреждённым подшипником аналогичным образом получим потребляемую активную мощность, суммарные потери и суммарное количество потерь при тех же условиях: $P_2 = 1\,271 \text{ Вт}$; $\Delta P_2 = 521 \text{ кВт}$; $\Sigma W_2 = 3\,803,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Вычислим разницу по потерям мощности:

$$\Sigma W = \Sigma W_2 - \Sigma W_1 = 3803,3 - 3504 = 299,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (5)$$

При средней стоимости электроэнергии 2,1 руб. за 1 кВт·ч [17] количество потерянной электроэнергии в денежном эквиваленте за этот период составит:

$$C_P = C_{1\text{кВт}\cdot\text{ч}} \cdot \Sigma \Delta P = 2,1 \cdot 8299,3 = 629 \text{ руб.} \quad (6)$$

Как правило, на промышленных предприятиях (в металлургической, горнодобывающей и нефтяной отраслях) мощность асинхронных машин гораздо выше 0,75 кВт. При увеличении мощности машины естественно предположить, что и потери увеличатся на порядок.

Произведём расчёт для двигателя мощностью 55 кВт (АИР 225 М2 с КПД при номинальной нагрузке $\eta_1 = 0,93$; номинальная скорость 2 820 об./мин) [18]. Предположим, что при наличии аналогичной неисправности, т. е. эксцентриситета ротора из-за повреждения подшипника КПД двигателя так же упадёт в этих пределах (в диапазоне 2–7%), т. е. снизится на 4% и составит $\eta_2 = 0,89$.

3. Проведём технико-экономический расчёт по определению возможных финансовых затрат по перерасходу электроэнергии для этого двигателя.

Двигатель с исправным подшипником. Активная мощность на зажимах:

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_1} = \frac{55000}{0,93} = 59\,139 \text{ Вт}. \quad (7)$$

Суммарные потери:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= \Delta p_{\text{э1}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{э2}} + \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{д}} = \\ &= P_1 - P_2 = 59\,139 - 55\,000 = 4140 \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (8)$$

Допустим, что данный двигатель работает 20 часов в сутки. Тогда суммарное количество потерь за год составит:

$$\begin{aligned} \Sigma W_1 &= \Delta P_1 \cdot t_{20\text{ч}} \cdot n_{\text{д}} = 4140 \cdot 20 \cdot 365 = \\ &= 30\,222 \cdot 10^3 = 30\,222 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \end{aligned} \quad (9)$$

4. Аналогичным образом для асинхронного двигателя с повреждённым подшипником получим потребляемую активную мощность, суммарные потери и суммарное количество потерь при тех же условиях: $P_2 = 62 \cdot 10^3$ Вт; $\Delta P_2 = 7 \cdot 10^3$ Вт; $\Sigma W_2 = 51\,100$ кВт·ч. Вычислим разницу по потерям мощности:

$$\Sigma \Delta W = \Sigma W_2 - \Sigma W_1 = 51\,100 - 30\,222 = 20\,878 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (10)$$

Аналогично при средней стоимости электроэнергии 2,1 руб. за кВт·ч [17] количество потерянной электроэнергии в денежном эквиваленте за этот период составит: $C_p = 43\,844$ руб.

Стоимость одного такого двигателя АИР 225 М2 составляет 40 400 руб. (цена на 17.10.2013) [18]. Исходя из этого упреждающая диагностика особенно актуальна для асинхронных машин средней и большой мощности. Внезапный выход из строя такого двигателя влечёт за собой большие затраты и может создать аварийную ситуацию. Следовательно, потери при наличии эксцентриситета ротора при эксплуатации в течение года соизмеримы со стоимостью самого двигателя. Если иметь в виду, что, как прави-

ло, среднее промышленное предприятие насчитывает десятки работающих асинхронных двигателей более энергоёмкого класса и что технологические отказы, связанные с повреждениями, вызывают простои, то можно предположить, что финансовые потери будут гораздо большими.

По результатам проведённой работы можно сделать следующие заключения:

1. Наличие эксцентриситета ротора существенно снижает энергоэффективность работы асинхронного двигателя, что влечёт за собой перерасход электрической энергии.

2. Спектральный анализ тока статора позволяет осуществить выявление эксцентриситета ротора на начальных стадиях его развития, что даёт возможность более эффективного планирования ремонтных работ и сводит к минимуму возможность аварий, которые сопряжены со значительными экономическими издержками.

3. Описываемый метод особенно хорошо подходит для установок, доступ обслуживающего персонала к которым затруднён и незапланированный выход из строя которых особенно критичен.

Работа выполнена при финансовой поддержке УрФУ в рамках реализации программы развития УрФУ для победителей конкурса «Молодые учёные УрФУ»

This research project has been supported by UrFU under the Framework Programme of Development of UrFU through the "Young scientists of UrFU" competition.

Литература

1. Sahil Sahni, Avid Boustani, Timothy Gutowski, Steven Graves / Electric motor remanufacturing and energy savings / MITEI-1, January 2010, 1–31 pp.
2. Крупенин Н. В., Голубев А. В., Завидей В. И. Новые возможности в диагностике электрических машин // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 45–47.
3. Сурков Д. В. Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей: Дисс. канд. техн. наук: 05.09.01. Оренбург, 2008. – 127 с.
4. Fiorrenzo Filippetti, Alberto Bellini, Gerard-Andre Capolino. Condition Monitoring and Diagnosis of Rotor Faults in Induction Machines: State of Art and Future Perspectives // Published in conference WEMDCD 2013, March 11–12, IEEE, 196–209 pp.
5. Jawad Faiz, Bashur Mahdi Ebrahimi, Bilal Akin, Hamid A. Toliyat. Comprehensive eccentricity fault diagnosis in induction motors using finite element method // IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 45, No. 3, March 2009.
6. Кужеков С. Л., Колпахчян П. Г., Сербиновский Б. Б., Рогачёв В. А. Токи статора асинхронного электродвигателя с эксцентриситетом ротора // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – № 4.
7. Полищук В. И., Новожилов А. Н., Исупова Н. А. Обзор способов диагностики эксцентриситета ротора машин переменного тока // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 29–33.
8. Петухов В. С., Соколов В. А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – № 1(31).

9. Муравлев О. П., Стрельбицкий Э. К. Определение неравномерности воздушного зазора в асинхронных двигателях по данным ОТК о числе задеваний ротора за статор / Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политех. ин-та. им. С. М. Кирова. Т. 145. 1966. – С. 121–127.
10. Вейнреб К. Б. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора: Дисс. д-ра техн. наук: 05.09.01. – Краков, Москва, 2012.
11. Барков А. В., Баркова Н. А., Борисов А. А., Федорищев В. В., Грищенко Д. В. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току: СПб: НОУ «Северо-Западный учебный центр» ООО «Вибротехника», 2012. – 67 с.
12. Doosoo Hyun, Jongman Hong, Ernesto J. Wiedenbug. Automated Monitoring of Air-gap eccentricity for Inverter-fed Induction motors under standstill conditions // IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 47, Issue 3, 2010. 1257–1266 pp.
13. Bashir Mahdi Ebrahimi, Mehrsan Javan Roshtkhari. Advanced eccentricity fault recognition in permanent magnet synchronous motors using stator current signature analysis // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 61, Issue 4, 2013. 2041–2052 pp.
14. Муравлёв О. П., Немцев А. Д. Расчёт допусков на параметры, определяющие значение эксцентриситета в асинхронном двигателе // Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политех. ин-та им. С. М. Кирова. Т. 229, 1972. – 169–172 с.
15. Датчики тока LEM HX 03-20 P [Электронный ресурс]. Код доступа: www.fek.by/doc/components/L_O/Lem/hx03-20p.pdf
16. Датчики напряжения LEM LV 25-P [Электронный ресурс]. Код доступа: www.fek.by/doc/components/L_O/Lem/lv25-p.pdf
17. РИА «Новости» Аналитический бюллетень // Электроэнергетика. – 2013. – № 12.
18. Компания «Энергоснабкомплект», промышленное электрооборудование [Электронный ресурс]. Код доступа: www.esbk.ru/products.html

Diagnostics of induction motors based on spectral analysis of stator currents

N. R. Safin,

Ural Federal University, post-graduate student of Department of Electrical Engineering and Electric Technology Systems

V. A. Prakht,

Ural Federal University, Ph.D., associate professor of Department of Electrical Engineering and Electric Technology Systems

V. A. Dmitrievskii,

Ural Federal University, Ph.D., associate professor of Department of Electrical Engineering and Electric Technology Systems

A. A. Dmitrievskii,

Ural Federal University, post-graduate student of Department of Electrical Engineering and Electric Technology Systems

V. M. Kazakbaev,

Ural Federal University, postgraduate student of Department of Electrical Engineering and Electric Technology Systems

The article is dedicated to diagnostics of induction motors faults and their impact on motors' operational characteristics. Proactive diagnostics of induction motors allows us to detect faults at an early stage to increase energy efficiency of machines and reliability and profitability of production process.

Keywords: *induction motor, eccentricity, fault, diagnostics, energy efficiency.*