

ТОКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Дмитриевский А.А., Казакбаев В.М.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет» имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия, emf2010@mail.ru

Аннотация — В статье рассматриваются вопросы мониторинга и диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Показано, что наличие эксцентриситета ротора отрицательно влияет на энергетические характеристики асинхронных двигателей. Обосновано целесообразность упреждающей диагностики, что позволяет заблаговременно выявить дефекты на ранней стадии их развития.

Ключевые слова — асинхронный двигатель, эксцентриситет ротора, диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных критериев надежности асинхронных двигателей (АД) является равномерность воздушного зазора. Неравномерность воздушного зазора ухудшает энергетические характеристики, повышает уровень шума и вибрации асинхронных двигателей.

За величину неравномерности воздушного зазора можно принять эксцентриситет ротора относительно оси расточки статора [1].

Наличие эксцентриситета ротора приводит к одностороннему магнитному притяжению и повышенному износу подшипников. В этом случае, при работе АД происходит периодические соприкосновения ротора о статор (см. рис. 1).



Рис. 1. Первичные соприкосновения ротора о статор АД из-за наличия эксцентриситета ротора [2]

В таких условиях работ, дальнейшее задевание ротора о статор может привести к местному перегреву сердечников и соответственно к пробое изоляции статора (см. рис. 2).

По данным различных источников на эксцентриситет ротора приходится от 20 до 40 % отказов АД [3].

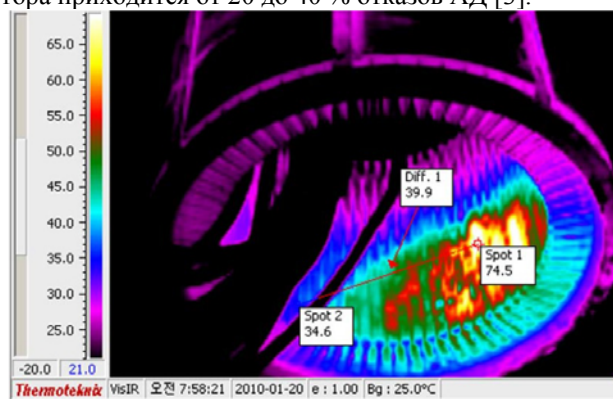


Рис. 2. Пробой изоляции статора вследствие местного перегрева сердечника из-за эксцентриситета ротора [4]

СПЕЦИФИКА ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА

При эксцентриситете ротора в АД под действием радиальной силы ось ротора смещается со своей первоначальной позиции, вызывая пульсацию электромагнитной силы, в основном в радиальном направлении, при этом происходит изменение воздушного зазора между статором и ротором. Амплитуда колебаний ротора и частота пульсаций зависит от величины эксцентриситета, параметров и конструкции АД.

В воздушном зазоре при этом возникает ряд особенностей. Плотность электромагнитного поля по окружности изменяется вместе с вращением ротора и приводит к неравномерности тягового усилия. При совпадении оси поля статора с зоной увеличенного зазора тяговое усилие снижается, и частота скольжения увеличивается. При смещении оси поля в зону меньшего зазора тяговое усилие увеличивается, а частота скольжения уменьшается. В спектре потребляемого тока эксцентриситет ротора генерирует ряд гармонических составляющих, сдвинутых на одинаковый шаг по частоте. Сдвиг между этими гармониками равен произведению частоты скольжения на число пар полюсов обмотки статора [5].

Существуют следующие типы эксцентриситета ротора (см. рис. 3) [6]: а) смешанный, когда ось вращения ротора не совпадает ни с осью симметрии статора O_s , ни с собственной осью симметрии O_r ; б) динамический, когда ось вращения ротора совпадает с

осью симметрии статора O_s и не совпадает с собственной осью симметрии O_r ; в) статический, когда ось вращения ротора совпадает с его осью симметрии O_r и не совпадает с осью симметрии статора O_s .

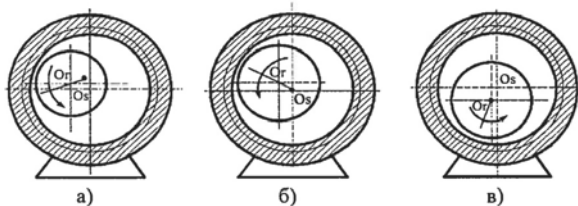


Рис. 3. Упрощенные поперечные сечения АД с эксцентриситетом ротора: а) смешанным; б) динамическим; в) статическим [6]

Существуют следующие методы диагностирования эксцентриситета ротора: посредством измерительного щупа; вибрационный способ посредством вибродатчиков; емкостной способ (измеряют при помощи конденсатора, обкладками которого являются электрод, расположенный в пазу статора электрической машины на уровне коронок зубцов, и поверхность ротора) и метод, основанный на спектральном анализе потребляемых токов статора.

Преимущественными способами диагностик неисправностей и дефектов АД, являются методы, основанные на вибродиагностике и спектральном анализе потребляемых токов статора [7].

Метод, основанный на спектральном анализе токов статора преимуществен с точки зрения удаленного мониторинга, т.е. посредством доступа к электрошлиту питания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для идентификации неисправности - эксцентриситета ротора на основе спектрального анализа токов статора и оценки влияния данной неисправности на энергетические характеристики АД в качестве испытуемого двигателя был использован АД АИР 71 А2У2 IM1081 (номинальная мощность 0,75 кВт; номинальная скорость 2820 об/мин). Опыты проводились в двух условиях: с заводским подшипником марки 6204 и с подменным подшипником марки 6005 с втулкой (см. рис. 4 и 5). Приведем размеры:

1. Изначальный подшипник АД - марка 6204 (см. рис. 4): внутренний диаметр $d=20$ мм; внешний диаметр $D=47$ мм; ширина подшипника $B=14$ мм;

2. Подменный подшипник АД - марка 6005 (см. рис. 5 б): 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 (см. рис. 5 б).

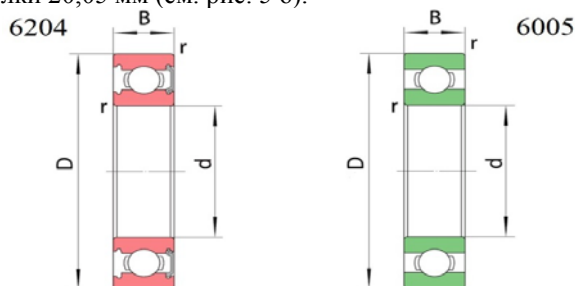


Рис. 4. Основные габаритные размеры подшипников марок 6204 и 6005

При данных условиях при работе АД с подменным подшипником с внутренней втулкой, эксцентриситет ротора создается за счет разницы посадки этой 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 используется в некоторых зарубежных работах [8, 9].



Рис. 5. Ротор и подшипники АД: а) внешний вид ротора; б) заводской подшипник с внутренней втулкой

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

Эксцентриситет ротора АД определяется относительной величиной ε ($0 < \varepsilon < 1$), которая выражается соотношением [6]:

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

где δ - значение воздушного зазора при эксцентриситете ротора, м; δ_{\min} - минимальное значение воздушного зазора, м.

Нормами допускается предельная величина эксцентриситета $\varepsilon=0,15$ [10]. В этом случае величина эксцентриситета ротора АД превышает нормированное значение в два раза ($\varepsilon_1=0,15$ и $\varepsilon=0,3$).

Запись мгновенных значений токов и напряжений выполнялось с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (USB3000) и измерительной платы с тремя датчиками токов LEM HX 02-P [11] и тремя датчиками напряжений LV25-P SP5 [12]. Полученные значения использовались для спектрального

анализа в пакете Matlab на основе быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform). Ниже показана фотография экспериментальной установки (см. рис. 6).

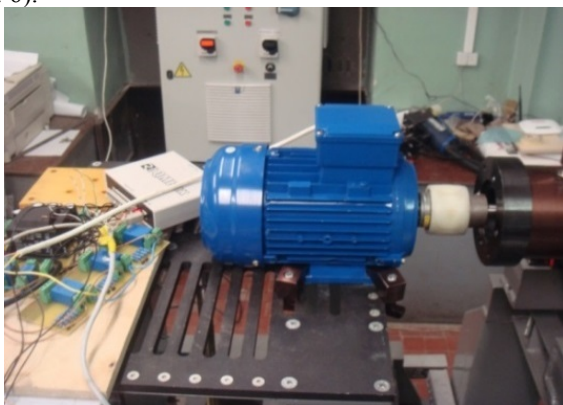


Рис. 6. Экспериментальная установка

При проведении исследований мгновенные значения токов и напряжений оцифровывались с помощью АЦП и записывались на персональный компьютер (ПК) для дальнейшей обработки в пакете Matlab.

Исходя из полученного графика по потребляемому току, можно отметить, что АД с поврежденным подшипником вызывает повышенный перерасход электроэнергии 65,74 Вт (см. рис. 7).

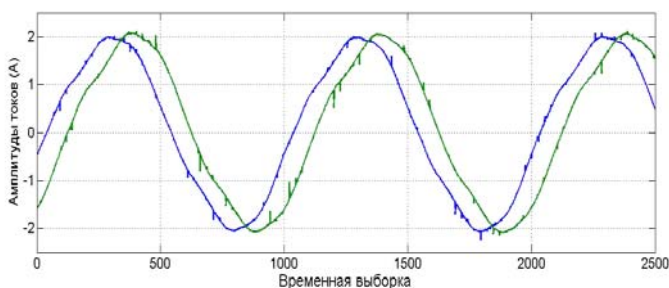


Рис. 7. Сравнительный график полученных токов АД при питании напрямую от сети: 1) нижняя (синяя) линия – бездефектный АД; 2) верхняя (зеленая) линия – АД с искусственным эксцентриситетом ротора

Ниже на графиках (см. рис. 8) приведен сравнительный спектр токов, исходя из них, можно отметить, что при случае АД с эксцентриситетом ротора (нижний график рис. 8), где имеется увеличение количества частотных полос и рост их величины (при значительном уровне сигналов в частотной области от -80дБ, где показано прямой линией) является признаком наличия неисправности – технологического эксцентриситета ротора [13].

После испытаний, полученные значения коэффициента полезного действия (КПД) при питании АД от сети выглядят следующим образом: с исправным подшипником $\eta_1=0,61$; с поврежденным подшипником $\eta_2=0,59$.

Полученное в эксперименте различие в КПД у исправного и с искусственной неисправностью АД: $\eta_1 - \eta_2 = 3,4\%$ показывает, что наличие технологического эксцентриситета ротора, существенно снижает энергоэффективность работы АД.

При этом, среднеквадратическое действующее значение токов при обоих режимах: в случае с исправным подшипником $I_1=2,1$ А; в случае с поврежденным подшипником $I_2=2,22$ А.

В таком режиме работ происходят косвенные непродуктивные (до 5-7%) затраты электроэнергии, обусловленным повышенным электропотреблением [13].

Определение степени серьезности повреждений производится по различной градации, в частности, например: «Повреждения отсутствуют»; «Повреждения обнаружены»; «Обнаружены критические повреждения».

При проведении повторных измерений на требуемом оборудовании формируется база данных, позволяющая отслеживать динамику развития повреждений во времени, что дает возможность заблаговременно планировать выведение оборудования в ремонт [13].

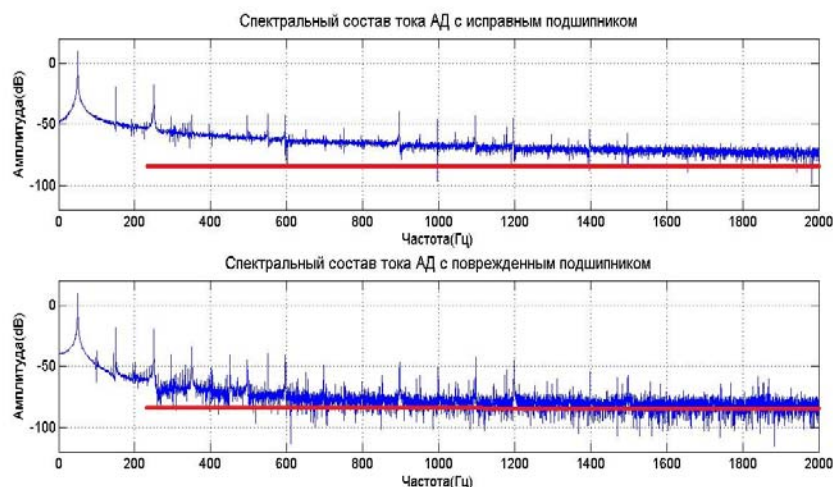


Рис. 8. Сравнительный вид полного спектра токов АД при питании напрямую от сети: АД с исправным состоянием (верхний график) и АД с наличием эксцентрисита ротора.

РАСЧЕТ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ УПРЕЖДАЮЩЕЙ
ДИАГНОСТИКЕ АД

1) Проведем технико-экономический расчет по определению возможных финансовых затрат для одного АД АИР 71 А2У2 ІМ1081 (номинальная мощность 0,75 кВт; номинальная скорость 2820 об/мин).

а) АД с исправным подшипником. Активная мощность на зажимах АД:

$$P_1 = \frac{P_H}{\eta_1} = \frac{0,75}{0,61} = 1,230 \text{ кВт}, \quad (2)$$

где P_H – номинальная мощность АД, кВт; η_1 – номинальное значение КПД при работе АД с исправным подшипником.

Суммарные потери:

$$\Delta P_1 = \Delta p_{\text{Э1}} + \Delta p_M + \Delta p_{\text{Э2}} + \Delta p_{\text{МЕХ}} + \Delta p_D = \\ = P_1 - P_2 = 1,230 - 0,75 = 0,48 \text{ кВт}, \quad (3)$$

где: $\Delta p_{\text{Э1}}$ – электрические потери в обмотке статора; $\Delta p_{\text{Э2}}$ – электрические потери в обмотке ротора; Δp_M – магнитные потери; $\Delta p_{\text{МЕХ}}$ – механические потери; Δp_D – добавочные потери.

Допустим, что данный двигатель работает 20 часов в сутки. Тогда суммарное количество потерь за год (365 дней) составит:

$$\sum W_1 = \Delta P_1 \cdot t_{20\text{ч}} \cdot n_d = \\ = 0,48 \cdot 20 \cdot 365 = 3504 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (4)$$

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

б) Аналогичным образом, для АД с эксцентриситетом ротора, получим: потребляемую активную мощность, суммарные потери и суммарное количество потерь при тех же условиях: $P_2=1,271$ кВт; $\Delta P_2=0,521$ кВт; $\sum W_2=3803,3$ кВт·ч. Вычислим разницу по потерям мощности:

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

При средней стоимости электроэнергии для промышленности 2,1 руб за кВт/ч [14], количество потерянной электроэнергии в денежном эквиваленте за этот период будет:

$$C_P = C_{1\text{кВт} \cdot \text{ч}} \cdot \sum W = 2,1 \cdot 299,3 = 629 \text{ руб}. \quad (6)$$

Однако, как правило, на промышленных предприятиях (в металлургической, горнодобывающей и нефтяной отраслях) мощность асинхронных машин гораздо выше 0,75 кВт. Можно отметить, что при увеличении мощности машины, то естественно и предположить, что и потери увеличатся на порядок. Произведем расчет для АД мощностью 75 кВт. (АИР 250 S2 с КПД при номинальной нагрузке $\eta_1=0,93$; номинальная скорость 2970 об/мин) [15]. Предположим, что при наличии аналогичной неисправности, т.е. эксцентриситета ротора из-за повреждения подшипника КПД АД также упадет в этих пределах (в диапазоне 2-7%), т.е. снизится на 4% и составит $\eta_2=0,89$.

2) Проведем технико-экономический расчет по определению возможных финансовых затрат по перерасходу электроэнергии для этого двигателя.

а) АД с исправным подшипником. Активная мощность на зажимах АД:

$$P_1 = \frac{P_H}{\eta_1} = \frac{75}{0,93} = 80,64 \text{ кВт}. \quad (7)$$

Суммарные потери:

$$\Delta P_1 = \Delta p_{\text{Э1}} + \Delta p_M + \Delta p_{\text{Э2}} + \Delta p_{\text{МЕХ}} + \Delta p_D = \\ = P_1 - P_2 = 80,64 - 75 = 5,64 \text{ кВт}, \quad (8)$$

Допустим, что данный двигатель работает 20 часов в сутки. Тогда суммарное количество потерь за год (365 дней) составит:

$$\sum W_1 = \Delta P_1 \cdot t_{20\text{ч}} \cdot n_d = \\ = 5,64 \cdot 20 \cdot 365 = 41209,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (9)$$

б) Аналогичным образом, для АД с эксцентриситетом ротора, получим: потребляемую активную мощность, суммарные потери и суммарное количество потерь при тех же условиях: $P_2=84,3$ кВт; $\Delta P_2=9,3$ кВт; $\sum W_2=67890$ кВт·ч. Вычислим разницу по потерям мощности:

$$\sum \Delta W = \sum W_2 - \sum W_1 = \\ = 67890 - 41209,7 = 26680,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (10)$$

Аналогично, при средней стоимости электроэнергии 2,1 руб за кВт/ч [14], количество потерянной электроэнергии в денежном эквиваленте за этот период составит: $C_P=56028,63$ руб.

Стоимость одного такого двигателя АИР 250 S2 составляет (цена на 31.12.2013) 56150 руб [15]. Исходя из этого, можно сказать, что упреждающая диагностика АД особенно актуально для асинхронных машин средней и большой мощности. Внезапный выход из строя таких АД влекут большие затраты и могут создать опасные аварийные ситуации. Отсюда следует, что наличие эксцентриситета ротора АД, при эксплуатации в течение года, соизмеримо с самой стоимостью самого двигателя. Если иметь в виду что, как правило, среднее промышленное предприятие насчитывает десятки работающих АД и более энергоемкого класса, также учесть, что внезапные технологические отказы, связанные с этими повреждениями влекут неблагоприятные простои и стоимость электроэнергии имеет тенденцию расти, то можно предположить, что финансовые расходы будут гораздо больше.

В 2013 году, как и в прошлом году, индексация тарифов на электроэнергию была проведена 1 июля. Цены на электроэнергию повышены в среднем по России на 12% [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Наличие эксцентриситета ротора заметно снижает энергоэффективность работы АД, что влечет за собой перерасход электрической энергии;

2. Спектральный анализ тока статора позволяет осуществить идентификацию эксцентриситета ротора на начальных стадиях его развития, что дает возможность более рационально планировать ремонтные работы.

Соответственно снизив к минимуму возможные неплановые аварии, которые сопряжены со значительными экономическими издержками и простоями;

3. Описываемый метод относится к онлайн диагностике и особенно хорошо подходит для промышленных установок, доступ обслуживающего персонала к которым сложен и незапланированный выход из строя которых особо критичен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Муравлев О.П., Немцев А.Д. Расчет допусков на параметры, определяющие значение эксцентриситета в асинхронном двигателе // Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова, Том 229, 1972.- 169-172 с.
2. Doosoo Hyun, Jongman Hong, Sang Bin Lee, Kwonhee Kim, Ernesto J.Wiedenbrug, Mike Teska, Subhasis Nandi, Ilamparthi Thilumarai Chelvan. / Automated monitoring of airgap eccentricity for inverted-fed induction motors under standstill conditions. / IEEE Transactions on industry applications, Vol. 47, No.4, 2011, pp.1257-1266.
3. Сурков Д.В. / Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей. // Дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук, Оренбург, 2008, с.127.
4. Jongman Hong, Doosoo Hyun, Sang Bin Lee, Christian Kral. / Monitoring of airgap eccentricity for inverter-fed induction motors based on the differential inductance. // IEEE, 2012, pp.3000- 3007.
5. Кужеков С.Л., Колпахчян П.Г., Сербиновский Б.Б., Рогачев В.А. Токи статора асинхронного электродвигателя с эксцентриситетом ротора // Известия вузов. Электромеханика № 4, 2008, с. 25-27.
6. Вейнреб К.Б. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора // Дисс. на соискание уч. степени докт. техн. наук: 05.09.01-Краков, Москва, 2012.
7. Полищук В.И., Новожилов А.Н., Исупова Н.А. Обзор способов диагностики эксцентриситета ротора машин переменного тока // Известия вузов. Электромеханика № 6, 2011. с. 29-33.
8. Doosoo Hyun, Jongman Hong, Ernesto J. Wiedenbrug. Automated Monitoring of Air-gap eccentricity for Inverter-fed Induction motors under standstill conditions // Industry Applications, IEEE Transactions on (Volume: 47, Issue: 3), 2010.-1257-1266 pp.
9. Bashir Mahdi Ebrahimi, Mehrsan Javan Roshtkhari. Advanced eccentricity fault recognition in permanent magnet synchronous motors using stator current signature analysis // Industrial Electronics, IEEE Transactions on (Volume: 61, Issue: 4), 2013.-2041-2052 pp.
10. Муравлев О.П., Стрельбицкий Э.К. Определение неравномерности воздушного зазора в асинхронных двигателях по данным ОТК о числе задеваний ротор за статор / Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова, Том 145, 1966.- 121-127 с.
11. Датчики тока LEM HX 03-20 P [Электронный документ]:
http://www.fek.by/doc/components/L_O/Lem/hx03-20p.pdf

12. Датчики напряжения LEM LV 25-P [Электронный документ]:

http://www.fek.by/doc/components/L_O/Lem/lv25-p.pdf

13. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока. – Новости электротехники, 2005, №5 1(31).

14. РИАРЕЙТИНГ Группа РИА Новости Аналитический бюллетень / Электроэнергетика, №12, М., 2013.

15. Компания «Энергоснабкомплект» промышленное электрооборудование [Электронный документ]:

<http://www.esbk.ru/products.html>