

Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей*

А.В. Лукьянов^а, Ю.С. Мухачев^б, И.О. Бельский^с

Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^аloukian@inbox.ru, ^бMukhachev_Yu_S@mail.ru, ^сbelskyigor92@gmail.com

Статья поступила 13.03.2014, принята 6.05.2014

Представлены результаты разработки и применения программно-аппаратного комплекса, позволяющего оценить уровень вибрации и напряженность внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей с целью диагностики развивающихся дефектов. Вопросы повышения надежности и долговечности асинхронных электродвигателей как наиболее ответственного звена в комплексах технологического оборудования являются наиболее важными. Проведены теоретические расчеты, описывающие зависимость изменения напряженности внешнего магнитного поля от наличия дефектов в асинхронных электродвигателях. Экспериментальные измерения производились при помощи разработанного авторами компактного переносного прибора со встроенным датчиком Холла. Опыты по определению параметров внешнего магнитного поля проводились на нескольких типах электродвигателей, по которым предварительно проведены вибрационные измерения. Виброизмерения и анализ параметров вибрации проводились с использованием виброколлектора СК-1100 и программы «Виброанализ 2.52» фирмы «Технекон». Результаты измерений обрабатывались с использованием специально созданной в программируемой среде MatLab программы «Fft_gui» для анализа временных сигналов напряженности магнитного поля и быстрого преобразования Фурье с целью получения спектральных характеристик. По результатам измерений индукции внешнего магнитного поля были построены круговые диаграммы и проведен спектральный анализ сигналов. Исследована зависимость развития дефектов от характера изменения на круговой диаграмме внешнего магнитного поля и спектрального состава. По результатам виброанализа и распределения внешнего магнитного поля двигателя составлен подробный список дефектов, обнаруживаемых при помощи данного комплексного метода диагностики.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, параметры вибрации асинхронного электродвигателя, параметры внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя, прибор измерения индукции внешнего магнитного поля.

Researching the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors

A.V. Lukyanov^а, Y.S. Mukhachev^б, I.O. Belsky^с

Irkutsk State Transport University, 15 Chernishevsky St., Irkutsk, Russia

^аloukian@inbox.ru, ^бMukhachev_Yu_S@mail.ru, ^сbelskyigor92@gmail.com

Received 13.03.2014, accepted 6.05.2014

The article has been presented the results of development and application of hardware and software complex allowing to estimate vibration level and tension of external magnetic field of asynchronous electric motors in order to diagnose growing defects. The most important are the questions of increasing reliability and longevity of asynchronous electric motors as the most responsible link in the complexes of technological equipment. There have been done some theoretical calculations describing dependence of changing tension of external magnetic field on the defects in asynchronous electric motors. Experimental measurements have been taken with the help of a compact portable device with the built-in sensor of Hall created by the authors of the article. Tests on determining the parameters of external magnetic field have been carried out on a few types of electric motors with preliminary taken oscillation measurements. Vibrational measurements and analysis of vibration parameters have been taken with the use of vibrational collector SK-1100 and a program «Vibroanalysis-2.52», «Technekon». The results of measurements have been processed with the use of the program «Fft_gui», specially designed in programmable environment MatLab for the analysis of temporal signals of magnetic field tension and fast Fourier transformation to get spectral descriptions. According to the results of measuring the external magnetic field induction, circular graphs have been constructed and spectral analysis of signals has been carried out. The dependence of defect growth on the change types has been shown on the circular graph of external magnetic field and spectral composition. According to the results of vibroanalysis and distribution of external magnetic field of electric motors, the list of the defects discovered with the help of the complex diagnostics method has been made.

* Работа проводится при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации "Иркут" с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218

Keywords: asynchronous electric motor, vibration parameters of asynchronous electric motor, parameters of the external magnetic field of asynchronous electric motor, device for external magnetic field measurements.

Введение. Асинхронные электродвигатели (АД) – наиболее распространенный в настоящее время вид электрических машин, составляющих основу привода большинства механизмов и машинного оборудования. Благодаря простоте и технологичности конструкции, высоким энергетическим показателям, эксплуатационной надежности и устойчивости к перегрузкам асинхронные двигатели широко используются в машиностроении, во всех отраслях промышленности и видах транспорта, в приводах различных станков, насосов, вентиляторов, компрессоров, грузоподъемных механизмов. Поэтому вопросы повышения надежности и долговечности АД как наиболее ответственного звена в комплексах технологического оборудования являются наиболее важными.

Оценка технического состояния электрических машин представляет собой важную задачу, решение которой позволяет обнаружить на ранней стадии зарождающиеся дефекты, предотвратить аварийные ситуации, способные привести к серьезным негативным последствиям. Поэтому разработка недорогих, простых в эксплуатации и точных методов контроля и диагностики состояния АД является актуальной. Наиболее эффективными являются методы вибродиагностики [1 – 4], теплового контроля [5 – 7], анализа параметров внешнего магнитного поля (ВМП) электрических машин [8].

Вибродиагностика наиболее эффективна при обнаружении большинства механических и части электрических дефектов, тепловой контроль выявляет дефекты, связанные с перегревом, а контроль параметров ВМП в перспективе позволит выявлять электрические дефекты АД. В совокупности данные методы хорошо взаимодополняют друг друга, так как основаны на измерении и анализе явлений различной физической природы. Развитие этих методов позволит комплексно оценивать техническое состояние АД и повысит достоверность диагностирования дефектов.

Математическая модель. Рассмотрим метод контроля и анализа параметров внешнего магнитного поля для задач диагностики развивающихся дефектов асинхронных электродвигателей. Как известно из теории, результирующее вращающееся магнитное поле электрических машин переменного трехфазного тока можно разложить на две составляющие магнитного момента по взаимно перпендикулярным направлениям главной плоскости машины:

$$\begin{aligned} M_{MX} &= 0, \\ M_{MY} &= M_M \cos(\omega \cdot t + \varphi_M), \\ M_{MZ} &= M_M \sin(\omega \cdot t + \varphi_M). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь: M_M ; ω ; φ_M – амплитуда, частота и фаза магнитного момента.

Рассмотрим проекцию ВМП на одну из осей, например, ось Z. Текущее значение магнитной индукции в зазоре машины будет:

$$B_\varphi = F_\varphi \cdot \lambda_\varphi, \quad (2)$$

где F_φ , λ_φ – текущие значения магнитодвижущей силы и магнитной проводимости воздушного зазора.

При симметричном расположении ротора относительно статора получим [9]:

$$\lambda_\varphi = \lambda_0 = \frac{\mu_0}{\kappa_\mu \cdot \kappa_\delta \cdot \delta_0}, \quad (3)$$

где κ_δ – коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера); κ_μ – коэффициент, учитывающий насыщение зубцовой зоны; δ_0 – величина зазора между ротором и статором; μ_0 – магнитная постоянная.

Основная гармоника намагничивающей силы в машине переменного тока:

$$F_\varphi = F_0 \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \quad (4)$$

где ω – частота вращения магнитного поля статора.

Получаем выражение:

$$B = B_m \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \quad (5)$$

где $B_m = F_m \lambda_0$ – амплитуда основной гармоники магнитной индукции при симметричном приведенном зазоре. Появление спектра гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре приводит к появлению аналогичного спектра во внешнем магнитном поле машины. Индукция внешнего магнитного поля с удалением от источника спадает по закону $B \equiv \frac{1}{R^{n+2}}$,

где n – порядок магнитной гармоники. Поэтому для основного внешнего магнитного поля машины с гармониками порядка p можно пренебречь гармониками порядка $(p+k)$ в связи с их малостью. Так как ВМП машины экранируется корпусом, это должно быть учтено, например, с помощью коэффициента экранирования κ_s . Тогда радиальную индукцию ВМП машины можно записать в виде:

$$B_R = B_0 \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \quad (6)$$

где $B_0 = \kappa_s B_m$.

Таким образом, индукция ВМП бездефектного двигателя изменяется по синусоидальному закону во времени (рис. 1).



Рис. 1. Основное рабочее окно программы «Fft_gui» с временным сигналом индукции ВМП бездефектного электродвигателя

Разработка прибора измерения ВМП. Для проведения экспериментальных измерений индукции ВМП на различных типах электродвигателей при имитации дефектов был разработан компактный переносной прибор, структурная схема которого представлена на рис. 2.

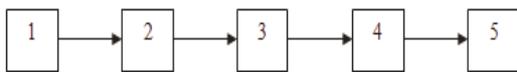


Рис. 2. Структурная схема прибора измерения индукции ВМП: 1 – источник питания; 2 – фильтры нижних частот; 3 – датчик Холла; 4 – усилитель; 5 – цифровой регистрирующий блок

С источника питания напряжение поступает на фильтры нижних частот, имеющих частоту среза $F_{cp} = 1000$ Гц, предназначенных для фильтрации

входного напряжения от высокочастотных составляющих и шумов от источника питания. Далее отфильтрованное напряжение поступает на линейный датчик магнитного поля (датчик Холла). При помещении датчика Холла в магнитное поле вектор магнитной индукции генерирует в датчике эквивалентную воздействию внешнему магнитному полю разность потенциалов. Выходное напряжение с датчика Холла поступает на усилитель, в котором усиливается и далее поступает на входной канал цифрового блока. В цифровом регистрирующем блоке аналоговый сигнал преобразуется в цифровой вид и запоминается для дальнейшего воспроизведения и анализа. Переносной прибор в корпусе с подключенным датчиком Холла и цифровой регистрирующий блок представлены на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Прибор измерения внешнего магнитного поля (а) и цифровой блок (б): 1 – датчик Холла в защитном кожухе; 2 – экранированный кабель; 3 – экранированный корпус

Калибровка прибора измерения ВМП проведена на специально изготовленном стенде, включающем катушку индуктивности, источник питания и амперметра. С целью определения коэффициента преобразования напряжения с выхода датчика Холла в размерность напряженности магнитного поля измерения проводились с использованием магнитоизмерительного феррозондового прибора Ф-205.30А. Измерения проводились феррозондовым преобразователем – полемером и разработанным прибором.

В одной и той же точке в центре катушки было произведено по восемь измерений полемером, положительной и отрицательной областью датчика, с целью определения чувствительности каждой из его сторон. После обработки результатов измерений получены коэффициенты преобразования для положительной K_{pU+} и отрицательной K_{pU-} областей

датчика $\left[\frac{A/M}{\text{в}} \right]$:

$$K_{pU+} = \frac{\langle H_n \rangle}{\langle U_+ \rangle} = \frac{232.1}{0.86} = 270;$$

$$K_{pU-} = \frac{\langle H_n \rangle}{\langle U_- \rangle} = \frac{232.1}{-1.119} = -207$$

С помощью калибровочного стенда была снята диаграмма направленности, т. е. зависимость выходного напряжения от угла α отклонения плоскости датчика (рис. 4).

Экспериментально определено, что при отклонении плоскости датчика на 20° от перпендикуляра к вектору магнитного поля, выходной сигнал изменяется на 100 mV, т. е. на 11,1 %.

В ходе опытов было выявлено, что наибольшей информативностью обладают составляющие поля, направленные по внешней окружности статора электродвигателя (рис. 5, б). Поэтому плоскость датчика ориентировалась перпендикулярно этим линиям поля.

Результаты измерений обрабатывались с использованием специально созданной в программируемой среде MatLab программы «Fft_gui» для анализа временных сигналов напряженности магнитного поля и быстрого преобразования Фурье с целью получения спектральных характеристик.

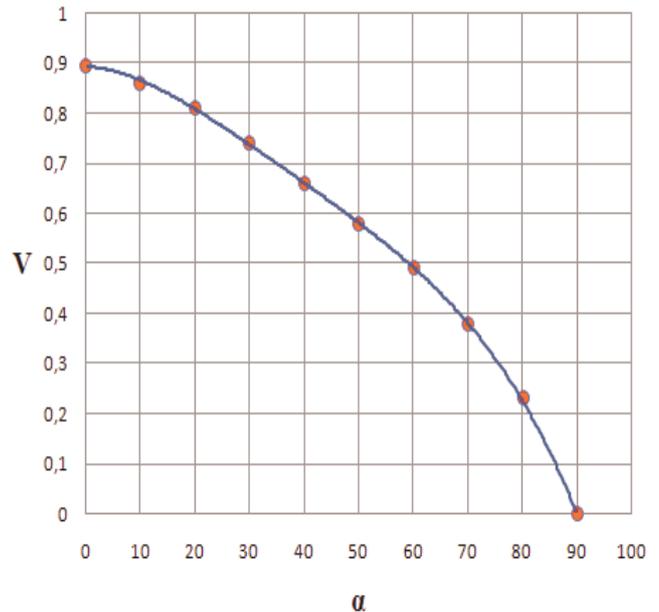


Рис. 4. Диаграмма направленности

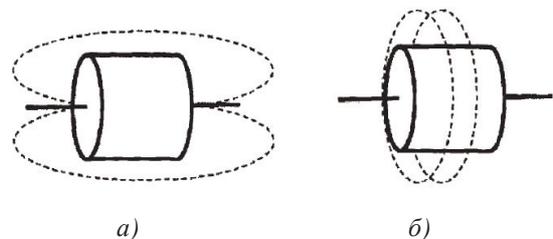


Рис. 5. Схематическое изображение составляющих ВМП двигателя

Продолжительность записываемого сигнала в формате txt составляла 5,12 сек., что позволяло получить спектр с разрешением 0,195 Гц (меньшая продолжительность регистрации снизит разрешение по спектру и даст неполную картину гармонического состава). Основное рабочее окно программы представлено на рис. 1.

Методика измерений. Для проведения опытов на двигателе выбирались фиксированные точки, в которых проводились измерения напряженности ВМП. Минимальное количество точек по окружности статора АД, позволяющее адекватно отобразить распределение ВМП, – восемь (рис. 6). Количество точек контроля можно увеличить, однако это повысит трудоемкость измерения и обработки данных. В выбранных точках необходимо было поставить маркеры, чтобы в дальнейшем исключить вероятность неточности установки датчика.

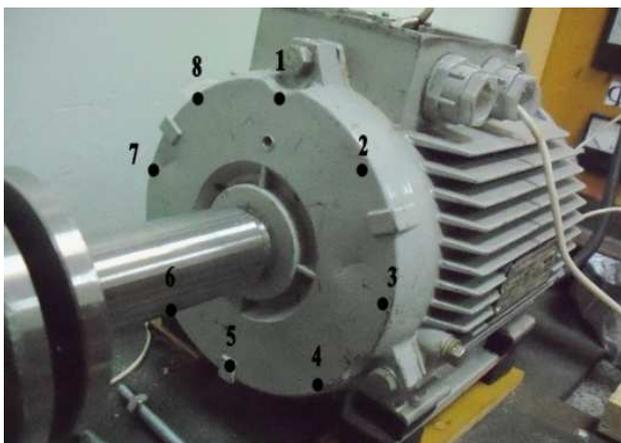


Рис. 6. Точки проведения замеров ВМП на двигателе АИР90Л4У3

Для этого последовательно в каждой точке производилась запись сигналов. Круговое измерение повторялось пять раз, что необходимо для уменьшения погрешности от неточной установки датчика. По усредненным значениям амплитуды ВМП строились круговые диаграммы напряженности ВМП.

Опыты по определению параметров ВМП проводились на нескольких типах электродвигателей, по которым предварительно проведены вибрационные измерения. Виброизмерения и анализ параметров вибрации проводились с использованием виброколлектора СК-1100 и программы «Виброанализ 2.52» фирмы «Технекон». Точки и направления измерений вибрации АД показаны на рис. 7.

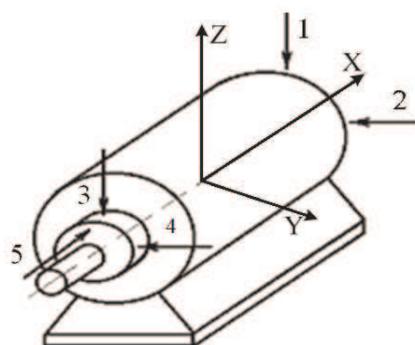


Рис. 7. Точки и направление измерения вибрации на АД

Результаты виброизмерений. Общий уровень вибрации (СКЗ виброскорости) и предварительный диагноз состояния по временному сигналу и спектру представлены в табл. 1.

Уровень вибрации электродвигателя № 1 в норме и соответствует допустимой вибрации для новых электродвигателей (1,4 мм/с). Основной вклад в СКЗ виброскорости вносят остаточный (неубранный при изготовлении) дисбаланс ротора (пик на оборотной частоте 24,9 Гц) и небольшие высокочастотные составляющие на частотах подшипников.

Вибрация АД № 2 несколько превышает допустимый для нового электродвигателя уровень, но в целом меньше допустимого эксплуатационного уровня (2,8 мм/с). Однако в спектре вибрации (рис. 8) присутствуют превалирующие пики на 2 и 4 гармониках частоты сети (100 Гц, 200 Гц), что свидетельствует о несимметрии токов в обмотках статора. Так как основной известный вибропризнак межвитковых замыканий – наличие основной гармоники на удвоенной частоте сети $2x f_c$, можно предположить наличие этого дефекта на начальной стадии.

Таблица 1

Данные асинхронных электродвигателей и результаты виброизмерений и диагностики

№	Тип АД, мощность	Результат вибродиагностики	СКЗ виброскорости, мм/с				
			т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5
1	AD90L4Y3 2,2 кВт	Исправен (новый АД)	0,68	0,94	1,08	1,20	1,19
2	АИР90Л4У3, 2,2 кВт	Межвитковое замыкание обмотки статора	1,43	1,24	1,01	1,40	1,03
3	4A100L4Y3, 4 кВт	Обрыв стержня ротора	5,94	1,78	1,31	1,78	4,03

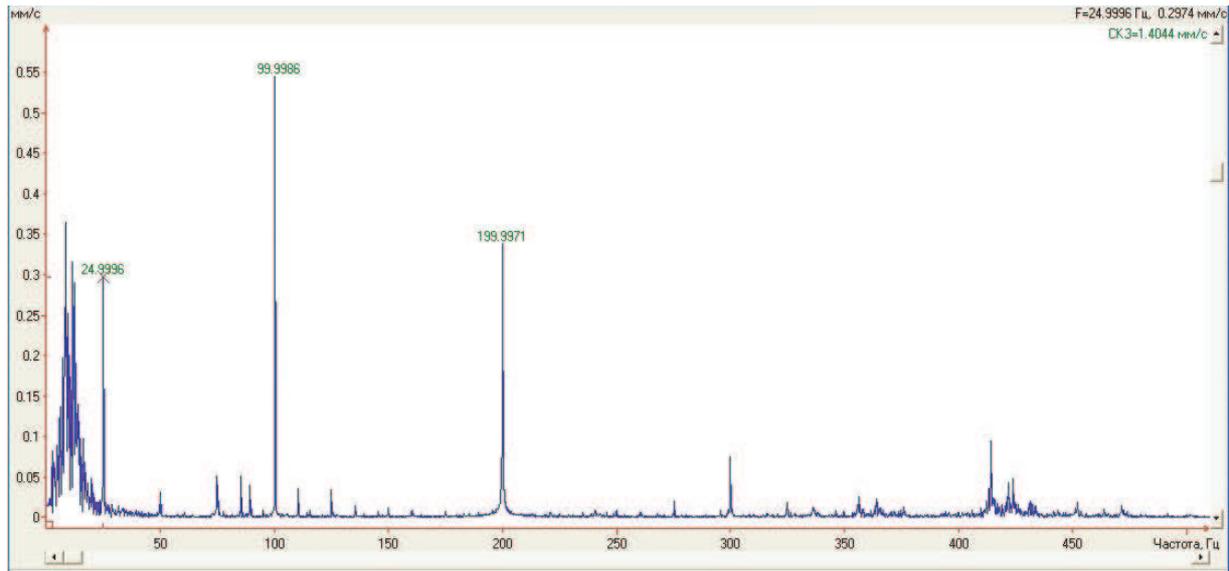


Рис. 8. Спектр виброскорости электродвигателя АИР90L4У3 в т. 1

Уровень вибрации электродвигателя № 3 весьма значителен и в т. 1 превышает допустимое значение (4,5 мм/с). Спектр виброскорости (рис. 9) имеет необычный вид, содержит составляющую на оборотной частоте $f_1 - 25$ Гц и значительное число (20) ее гармоник. Из них наибольшую амплитуду имеют 2, 3, 4 гармоники f_1 . Можно предположить, что это признаки электрического дефекта – обрыв стержня ротора. Характерные частоты вибрации при этом дефекте [10]: $kf_1 \pm nf_p$; $kf_{\text{паз}} \pm 2f_c$; $k, n = 1, 2, \dots$; $f_p = N_n \cdot f_s$; $f_s = f_m - f_1$; $f_{\text{паз}} = N_{\text{паз}} \cdot f_1$; N_n – число полюсов; f_s – частота скольжения; f_m – частота вращения магнитного поля; $N_{\text{паз}}$ – число пазов (стержней) ротора. Однако отсутствие вокруг гармоник оборотной частоты набора боковых полос частот прохода поля f_n ставит этот диагноз под сомнение. Например, характерный спектр виброскорости при дефекте «обрыв стержней ротора» приведен на рис. 10.

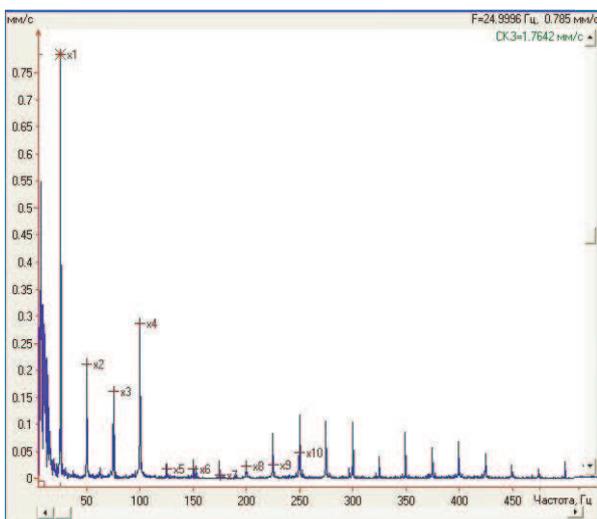


Рис. 9. Спектр виброскорости электродвигателя 4A100L4Y3 в т. 2 (работа в режиме холостого хода)

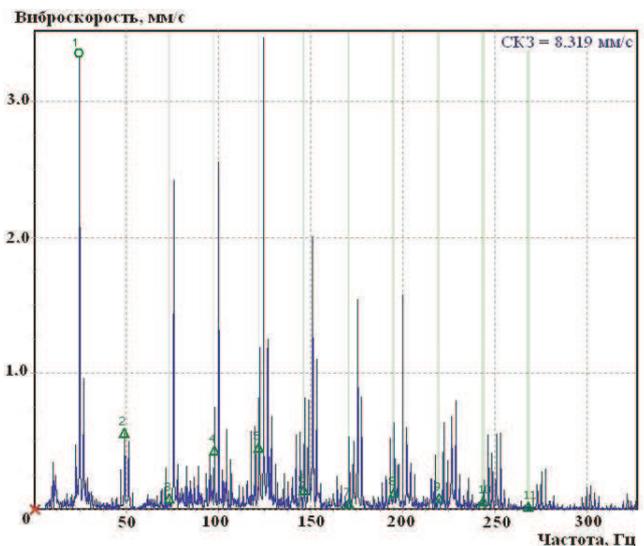


Рис. 10. Характерный спектр при дефекте «обрыв стержней ротора» (работа под нагрузкой)

Результаты измерений напряженности ВМП при развитии дефектов. С использованием разработанного прибора проведены измерения напряженности внешнего магнитного поля по внешней окружности статора в точках 1 – 8 (рис. 6) нового асинхронного двигателя № 1 (табл. 1). По методике, описанной выше, строятся круговые диаграммы и проводится спектральный анализ сигналов в точках с наибольшим значением амплитуды.

На рис. 11 приведена круговая диаграмма амплитуды напряженности ВМП этого двигателя. Круговая диаграмма напряженности ВМП близка к идеальной окружности, а амплитуда ВМП вокруг двигателя на равноудаленных точках почти одинакова – около 300 А/м. В т. 1 небольшое увеличение значения напряженности ВМП объясняется близостью датчика к коробке выводов (рис. 6).

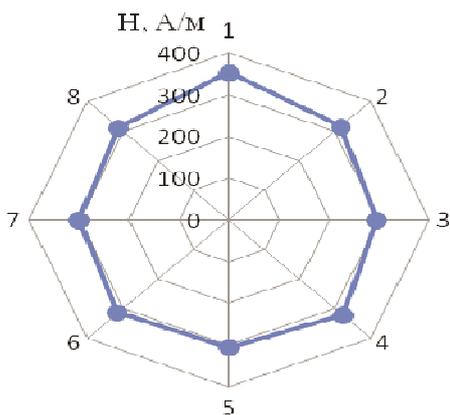


Рис. 11. Круговая диаграмма амплитуды напряженности ВМП нового АД № 1

Спектральный анализ сигнала с датчика, полученного в т. 1 (рис. 12), показывает, что амплитуда основной гармоники (50 Гц) ярко выражена, а амплитуды остальных гармоник (3, 5, 7) незначительны.

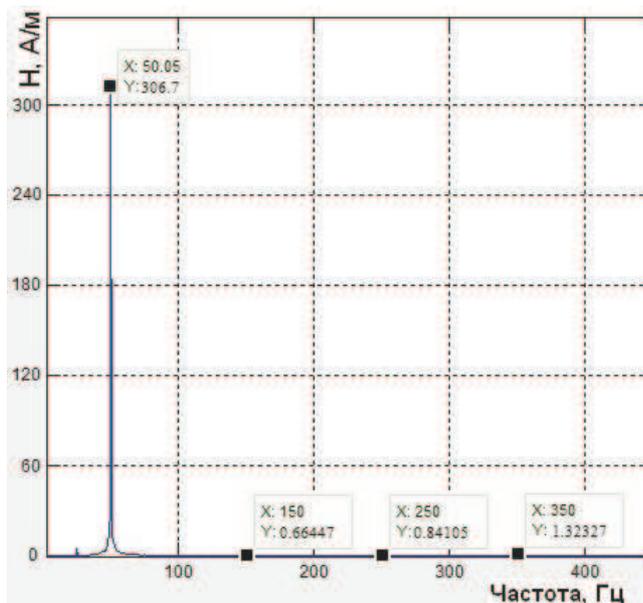


Рис. 12. Гармонический состав ВМП нового АД № 1

Исследования напряженности магнитного поля АД № 2 с предположительным дефектом «межвитковое замыкание обмотки статора» показали следующее. Временной сигнал имеет периодическую, стабильную по амплитуде форму, причем он несимметричен относительно нулевого значения: положительная амплитуда составляет $A_{H+} = 320$ А/м, отрицательная $A_{H-} = -180$ А/м. На рис. 13 представлена круговая диаграмма амплитуды напряженности ВМП двигателя АИР90L4У3. Амплитуда сигнала существенно неравномерна по окружности статора, что характеризует наличие электрического дефекта. Круговая диаграмма вытянута от точки 3 к точке 7 и имеет характерный вид для этого типа дефекта [9]. Максимальная

амплитуда в т. 7 меньше средней круговой амплитуды бездефектного двигателя (рис. 11) на 16 %, а минимальная – в 2,5 раза.

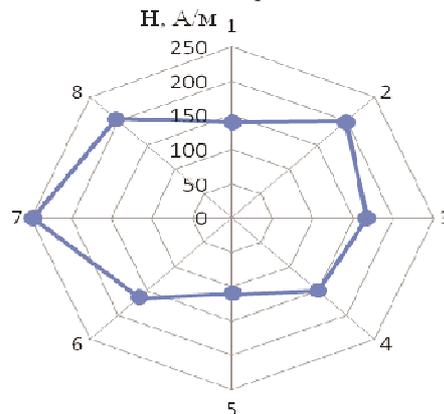


Рис. 13. Круговая диаграмма амплитуды напряженности ВМП двигателя № 2

На рис. 14 представлен спектральный состав сигнала напряженности ВМП в АД № 2 при межвитковом замыкании, полученного в точке максимума (т. 7). При анализе гармонического состава сигнала в различных точках измерения выявлено, что его характер не зависит от места расположения межвиткового замыкания и почти одинаков при разной амплитуде сигнала. Спектр сигнала показывает, что амплитуда основной гармоники (50 Гц) у дефектного двигателя № 2, так же, как и у нового двигателя № 1, существенно превалирует в спектре.

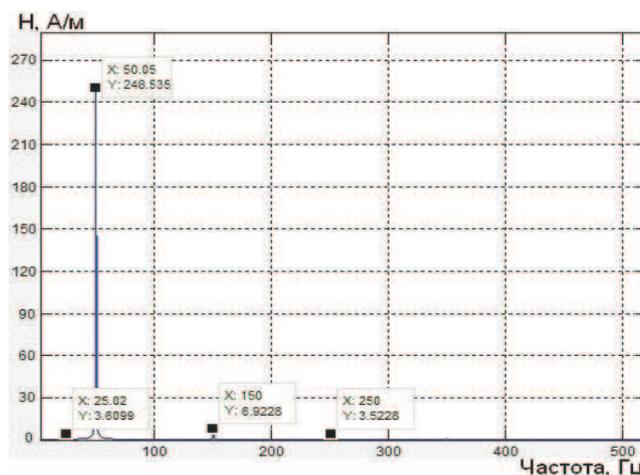


Рис. 14. Спектральный состав ВМП двигателя № 2, точка 7

Однако амплитуда третьей гармоники (150 Гц) у дефектного двигателя увеличилась в 10 раз, у пятой гармоники (250 Гц) – более чем в 4 раза. Признаки искажения формы ВМП практически те же, что и приведенные в работе [9], в которой дефект «межвитковые замыкания обмоток статора» создавался целенаправленно. Следовательно, предварительная диагностика по данным вибрации этого типа дефекта уточнена при анализе напряженности ВМП, что повышает достоверность данного комплексного метода диагностирования по совокупности двух параметров различной физической природы.

Одним из самых распространенных дефектов асинхронных электродвигателей является растрескивание и обрыв стержней ротора, выполненного в виде беличьей клетки. Достоверная диагностика этого дефекта позволит предотвратить внезапные отказы, повысить надежность привода. Использование данных вибродиагностики часто бывает недостаточно, чтобы распознать этот дефект. В приведенном выше примере (рис. 9) отсутствие вокруг гармоник оборотной частоты характерного набора боковых полос частот прохода поля f_n не позволяет уверенно распознать данный дефект на ранней стадии (большое количество гармоник оборотной частоты характерно и для механических дефектов в электродвигателях (механическое ослабление неподвижных соединений и люфты в подвижных соединениях)).

Проведенные исследования напряженности магнитного поля АД № 3 показали следующее:

- средняя амплитуда ВМП (120 А/м) более мощного (4 кВт) двигателя № 3 (рис. 15) в 2,5 раза меньше аналогичной амплитуды ВМП (300 А/м) у менее мощного (2,2 кВт) АД № 1 (рис. 11);

- форма круговой диаграммы амплитуды напряженности ВМП (рис. 15) существенно отличается от окружности, имеет характерную форму эллипса со

впадиной с максимумом 160 А/м (т. 2) и минимумом 70 А/м (т. 1).

Анализ гармонического состава спектра сигнала (рис. 16), замеренного в точке наибольшей амплитуды ВМП (т. 2), показывает увеличение амплитуд 3 и 17 гармоник, которые стали соизмеримы с первой гармоникой (50 Гц). Значительно увеличились амплитуды нечетных гармоник с 5 по 15. Появились низкочастотные четные гармоники 2, 4. Данный спектр характеризует двигатель с дефектом «обрыв стержня ротора».

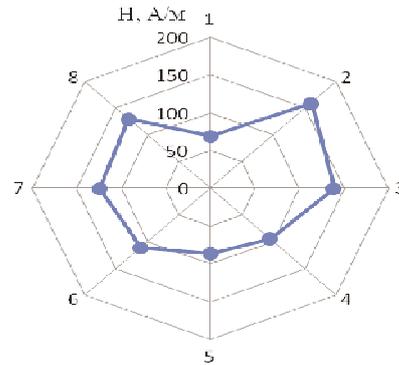


Рис. 15. Круговая диаграмма напряженностей ВМП двигателя № 3 с дефектом «обрыв стержня ротора»

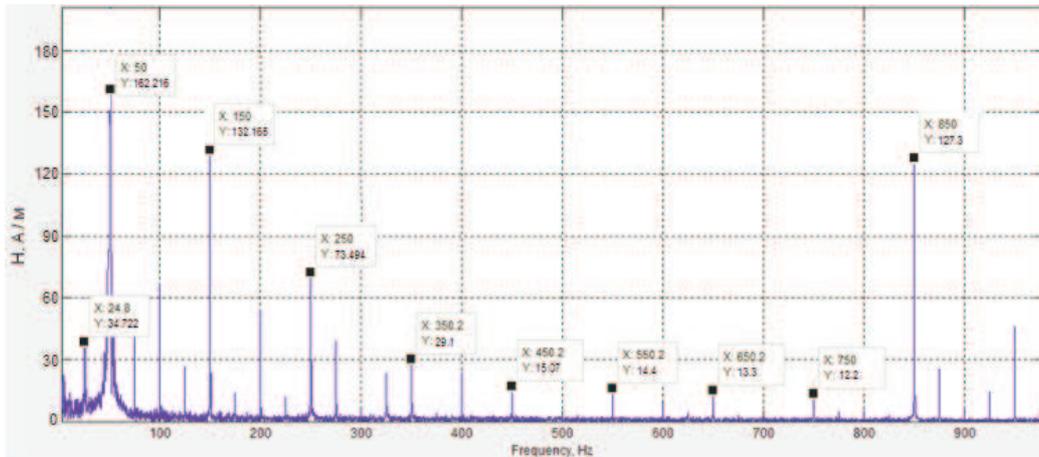


Рис. 16. Гармонический состав ВМП АД № 3 с дефектом «обрыв стержня ротора» (т. 2)

Таблица 2

Возможность выявления дефектов

Тип неисправности	Вибродиагностика	Анализ внешнего магнитного поля
Обрыв фазы	да	да
Несимметрия питающего тока	да	да
Отклонение частоты сети		да
Межфазные и межвитковые замыкания		да
Чрезмерная нагрузка	да	
Сломанные стержни ротора	да	да
Короткое замыкание в статоре		да
Разрушение подшипников	да	да
Недостаточная смазка	да	
Дисбаланс	да	
Расцентровка	да	
Механическое ослабление, люфты	да	

Эксцентриситет воздушного зазора	да	да
----------------------------------	----	----

Разрабатываемый комплексный метод, основанный на вибродиагностике и анализе внешнего магнитного поля машины, в перспективе позволит обнаружить до 90 % возможных дефектов асинхронных электродвигателей, повысить достоверность диагностики. В табл. 2 представлены виды дефектов, которые возможно обнаружить с помощью комплексного вибрационного и магнитного методов контроля и диагностики

Выводы

В ходе проведенных исследований разработан компактный переносной прибор для измерения напряженности внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей; разработан стенд, позволяющий производить испытания в различных режимах работы АД и при разных дефектах. Проведено совместное исследование параметров вибрации и внешнего магнитного поля при дефектах «межвитковые замыкания» и «обрыв стержня ротора». Выявлено, что развитие дефектов электродвигателя влияет не только на параметры вибрации, но и на изменение его внешнего магнитного поля, в частности на вид круговой диаграммы амплитуды и спектр напряженности ВМП.

Разработка методов контроля и диагностики дефектов АД по параметрам ВМП даст возможность получить достоверную информацию не только о видах дефектов, но и о степени их развития.

Для определения диагностических признаков дефектов асинхронных электродвигателей на первом этапе измерена напряженность магнитного поля по внешней окружности статора, по параметрам которой была построена круговая диаграмма амплитуды и определен гармонический состав напряженности ВМП двигателя без дефектов, принятого в качестве эталонного. Круговая диаграмма амплитуды ВМП практически симметрична и имеет форму окружности, тогда как спектр содержит только первую гармонику (50 Гц) напряженности ВМП при отсутствии высокочастотных составляющих.

Моделирование дефектов «межвитковое замыкание» и «обрыв стержня ротора» электродвигателей показало, что круговые диаграммы амплитуды и гармонические составы спектров напряженности ВМП резко отличаются от эталонных. При этих дефектах круговые диаграммы амплитуды напряженности ВМП резко изменяют свою форму, становятся несимметричными.

Наличие в спектре напряженности ВМП АД, наряду со значительной составляющей 1-й гармоники 50 Гц, относительно небольших (1-3 %) составляющих гармоник порядка $2n-1$, $n = 2, 3$ может служить диагностическим признаком межвитковых и межфазных замыканий обмотки статора.

Диагностическим признаком дефекта «обрыв стержня ротора» является увеличение амплитуды нечетных гармоник $2n-1$; $n = 1, 2, \dots, 9$, причем амплитуды 3 и 17 гармоник становятся сопоставимы с

амплитудой 1-й гармоники (50 Гц). Появляются также низкочастотные четные гармоники $2n$, $n = 1, 2$.

Литература

1. Лукьянов А.В., Портной А.Ю., Гарифулин В.Ю., Романовский А.И. Разработка комплекса входного виброконтроля вспомогательных машин электровозов при текущем ремонте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 2. С. 45-50.
2. Портной А.Ю., Лукьянов А.В., Лебедева Н.Ю., Лукьянов Д.А., Романовский А.И. Устройство для измерения вибрации: пат. 2492441 Рос. Федерация. № 2010118565/28 заявл. 07.05.10. опубл.10.09.13, Бюл. № 25. 7 с.
3. Лукьянов А.В., Романовский А.И. Виброактивность вспомогательных машин электровозов ВЛ-80, ВЛ-65 и рекомендации по ее снижению // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2006. № 4. С. 51-63.
4. Лукьянов Д.А., Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Вычисление параметров и визуализация пространственных колебаний шпинделя обрабатывающего центра по результатам виброизмерений // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 12. С. 52-58.
5. Капустин Н.И., Лукьянов А.В., Перельгин В.Н., Капустин А.Н. Комплекс термодиагностики оборудования электровозов // Железнодорожный транспорт. 2010. № 3. С. 41-44.
6. Капустин А.Н., Гарифулин В.Ю., Перельгин В.Н., Лукьянов А.В. Эффективное сопоставление изображений в инфракрасном и оптическом спектральных диапазонах с использованием стереопары «тепловизор – видеокамера» // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 2. С. 87-98.
7. Лукьянов А.В., Перельгин В.Н., Климов И.В. Визуальное моделирование и экспериментальные исследования оптического метода определения положения букс // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4. С. 121-127.
8. Тонких В.Г. Исследование процессов изменения формы внешнего магнитного поля электродвигателя при развитии в нем различных дефектов // Измерение, контроль, информатизация: материалы девятой международной НТК. Барнаул: АлтГТУ, 2006. С. 56.
9. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. 20 с.
10. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 228 с.

References

1. Lukyanov A.V., Portnoy A.Y., Garifulin V. Y., Romanovsky A. I. Developing a set of input vibration control for auxiliary machines of electric locomotives at current repairing // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2010. № 2. P. 45-50.
2. Portnoy A.Yu., Lukyanov A.V., Lebedeva N.Yu., Lukyanov-D.A., Romanovsky A.I. Vibration measuring apparatus: pat. No 2492441 Rus. Federation. No 2010118565/28; decl. 07.05.2010; publ.10.09.2013. Bull. № 25. 7 p.
3. Lukyanov A.V., Romanovsky A.I. Vibration activity of auxiliary machines of electric locomotives VL-80, VL-65 and recommendations for its reduction // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2006. № 4. P. 51-63.
4. Lukyanov D.A., Aleynikov D.P., Lukyanov A.V. Calculation of parameters and visualization of space oscillations of the machining center spindle according to the results of vibration measurements // Vestn. Irkut. gos. tehn. un-ta. 2013. № 12. P. 52-58.
5. Kapustin N.I., Lukyanov A.V., Perelygin V.N., Kapustin A.N. Thermodiagnosics complex for the equipment of electric locomotives // Zheleznodorozhnyj transport. 2010. № 3. P. 41-44.
6. Kapustin A.N., Garifulin V.Y., Perelygin V.N., Lukyanov A.V. Effective matching of images in infrared and optical spectral ranges using a stereo pair «thermal imaging camera – video camera» // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2008. № 2. P. 87-98.
7. Lukyanov A.V., Perelygin V.N., Klimov I.V. Visual modeling and experimental study of the optical method for determining the position of

axle boxes // *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie.* 2010. № 4. P. 121-127.

8. Tonkich V.G. Investigation of the processes of changing the form of an external magnetic field of engine with various developed defects // *Izmerenie, kontrol, informatizacija: materialy devjatoj mezhdunarodnoj NTK.* Barnaul: AltGTU, 2006. P. 56.

9. Tonkich V.G. Method of diagnosis of induction engines in agriculture on the basis of analysis of the parameters of the external magnetic field. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Science (author's abstract). Barnaul Univ AltSTU 2009. 20 p.

10. Lukyanov A.V. Qualifier of vibrodiagnostics defect signs for rotary machines. Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 1999. 228 p.