



**ВАСЬКОВСКИЙ Ю.Н.**, докт. техн. наук, профессор,  
**ГЕРАСКИН А.А.**, канд. техн. наук,  
НТУ Украины "Киевский политехнический ин-т"

## **ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ И КОЭФФИЦИЕНТОВ**



**ВАСЬКОВСКИЙ Ю.Н.**



**ГЕРАСКИН А.А.**

*В статье представлены результаты математического моделирования и анализа вибровозмущающих сил в короткозамкнутых асинхронных двигателях при наличии дефектов ротора. Целью исследования является обоснование методологии вибрационной диагностики дефектов роторов короткозамкнутых асинхронных двигателей на основе системы диагностических признаков и коэффициентов.*

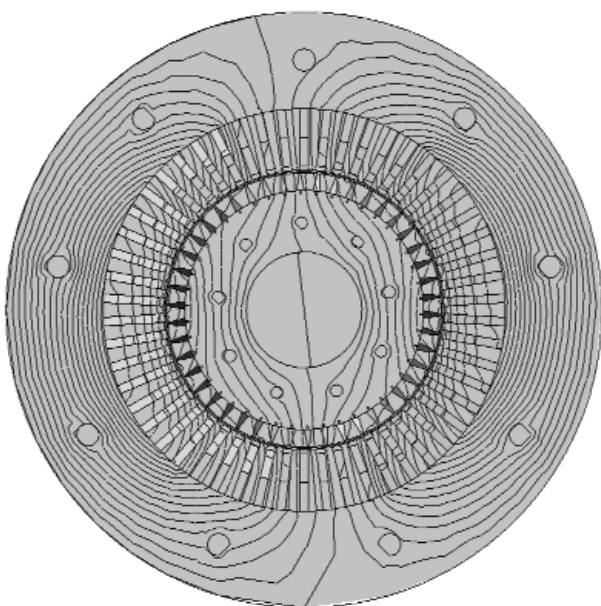
**Актуальность темы.** Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором мощностью 300 ... 5000 кВт широко применяются на электростанциях различного типа для привода механизмов собственных нужд: вентиляторных установок, насосно-компрессорных агрегатов, шаровых мельниц и других устройств. Значительное число мощных эксплуатируемых двигателей уже отработало гарантийные сроки своей работы, что привело к снижению их надежности и увеличению количества случаев внезапной аварийной остановки. В связи с этим в современных условиях с целью предотвращения негативных последствий внезапной аварийной остановки АД особое значение приобретает создание эффективных систем контроля технического состояния и диагностики повреждений АД. В частности, актуальным является диагностика повреждений короткозамкнутого ротора – узла конструкции, который наиболее сложно поддается диагностике. В АД могут иметь место повреждения различных элементов конструкции ротора:

обрыв стержней короткозамкнутой обмотки ротора (КЗОР), обрыв сегментов короткозамыкающих колец (СКК), а также статический и динамический эксцентриситеты (соответственно СЭ и ДЭ), которые также можно отнести к повреждениям ротора. Поэтому система диагностики должна не только выявлять повреждения ротора, но и определять указанные виды повреждений, что требует построения и обоснования соответствующей системы диагностических признаков.

На сегодняшний день известны различные методы и соответствующие им системы контроля технического состояния и диагностики повреждений АД: диагностика по результатам спектрального анализа потребляемого тока [4], диагностика по спектру потребляемой мощности [3], вибрационная диагностика [1, 2, 5]. Наиболее перспективной является вибрационная диагностика, которая имеет наибольшую чувствительность и которую целесообразно применять для диагностики мощных электрических машин. В системах вибродиагностики применяются датчики виброускорения, в основу действия которых положен пьезоэлектрический эффект.

Обоснование системы диагностических признаков целесообразно выполнить методами математического моделирования, для чего необходима разработка математических моделей АД, обладающих соответствующими дефектами. При этом в отличие от приближенных аналитических моделей полевые модели позволяют строго учитывать различные факторы: особенности геометрии зубцево-пазовой зоны АД, эффекты насыщения, вытеснения тока и др. Поэтому обоснование системы диагностических признаков необходимо проводить на базе полевых моделей АД.

**Результаты исследований.** Исследования проводились на примере двигателя собственных



**Рис. 1.** Распределение токов в обмотках и изолинии векторного магнитного потенциала в АД-5000



нужд электростанций АД-5000 (Рис. 1), имеющих следующие данные: номинальная мощность – 5000 кВт; номинальное линейное напряжение – 6000 В; номинальный фазный ток – 545 А; число пар полюсов – 1; воздушный зазор – 6 мм; диаметр расточки статора – 675 мм; номинальное скольжение – 0,005.

**Математическая модель.** Полевая математическая модель исследуемого асинхронного двигателя в двумерной постановке базируется на дифференциальном уравнении в частных производных, сформулированном в роторной системе координат [1]. Это уравнение численно решается методом конечных элементов в системе программ COMSOL Multiphysics:

$$\Delta \dot{A}_z - j\omega_1 s \mu \gamma \dot{A}_z = -\mu \mathbf{j}_{zs} + \mu \gamma \frac{\partial \phi}{\partial z},$$

где  $\dot{A}_z$  – аксиальная составляющая векторного магнитного потенциала;  $s$  – скольжение ротора;  $\omega_1$  – угловая частота вращения поля статора;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала;  $\partial \phi / \partial z$  – разность потенциалов на концах ротора, возникающая в результате появления в роторе различных повреждений;  $\mathbf{j}_{zs}$  – плотность сторонних токов.

Важной составляющей указанной математической модели является модель вибровозмущающих электромагнитных сил [2], которые определяются с помощью тензора магнитного натяжения Максвелла  $\vec{T}_n$ , характеризующего плотность электромагнитной силы, приложенной к поверхности расточки статора. В нормально-тангенциальной системе координат вектор тензора магнитного натяжения разделяется на нормальную  $\vec{T}_n$  и тангенциальную  $\vec{T}_\tau$  составляющие:

$$\vec{T} = n\vec{T}_n + \tau\vec{T}_\tau$$

Нормальная составляющая тензора магнитного натяжения (направлена вдоль вектора нормали к поверхности расточки статора) характеризует действие радиальных вибровозмущающих электромагнитных сил на сердечник статора, а тангенциальная составляющая (направлена вдоль касательной к поверхности ротора) – колебания электромагнитного момента. Для задачи вибродиагностики актуальным является анализ радиальных вибраций, которые фиксируются датчиками виброускорения. Поэтому в дальнейшем исследуется нормальная составляющая тензора магнитного натяжения. При этом, учитывая периодический характер изменения вибровозмущающих сил, целесообразно выполнить спектральный анализ тензора натяжения и перейти к исследованию отдель-

ных составляющих спектра. Это позволяет установить диагностические признаки, соответствующие разным видам повреждений.

**Система диагностических коэффициентов для определения повреждений ротора АД.** Вводится следующая система диагностических коэффициентов, дающих количественную оценку изменений в спектрах сигналов датчиков вибрации при появлении повреждений. Исследуются числовые значения этих коэффициентов в зависимости от характера и степени развития повреждений ротора, и обосновывается возможность их использования в системах вибрационного контроля и диагностики. Диагностическими коэффициентами являются следующие коэффициенты:

1. Коэффициент изменения среднеквадратичного значения (СКЗ) спектра виброускорения  $k_{СКЗ\_a}$ , который характеризует отношение СКЗ спектра виброускорения поврежденного АД к СКЗ спектра виброускорения неповрежденного АД и рассчитывается по формуле:

$$k_{СКЗ\_a} = \sqrt{\sum_{i=1}^N |T_{ni\_II}|^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^N |T_{ni\_III}|^2}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество учтенных гармоник в спектре;  $i$  – номер гармоники;  $T_{ni\_II}$ ,  $T_{ni\_III}$  – амплитуды  $i$ -й гармоники нормальной составляющей тензора магнитного натяжения в спектрах сигналов датчиков вибрации соответственно поврежденного и неповрежденного АД.

2. Коэффициент изменения СКЗ спектра виброскорости  $k_{СКЗ\_v}$ , который характеризует отношение СКЗ спектра виброскорости поврежденного АД к СКЗ спектра виброскорости неповрежденного АД и рассчитывается по формуле:

$$k_{СКЗ\_v} = \sqrt{\sum_{i=2}^N \left( \frac{|T_{ni\_II}|}{i} \right)^2} / \sqrt{\sum_{i=2}^N \left( \frac{|T_{ni\_III}|}{i} \right)^2}. \quad (2)$$

Обозначение переменных в формуле (2) такие же, как и в формуле (1).

Коэффициенты  $k_{СКЗ\_a}$  и  $k_{СКЗ\_v}$  рассчитываются без учета постоянной составляющей спектра  $T_{n0}$ , поскольку эта составляющая непосредственно не измеряется пьезоэлектрическими датчиками виброускорения. Коэффициенты  $k_{СКЗ\_a}$  и  $k_{СКЗ\_v}$  представляют собой интегральные показатели, характеризующие в целом существующий уровень вибраций в исследуемом АД.

3. Коэффициент оборотных гармоник  $k_{OB}$ , который характеризует отношение СКЗ совокупности оборотных гармоник, частоты которых крат-



ны частоте вращения ротора АД, к амплитуде гармоники частоты 100 Гц неповрежденного АД и рассчитывается по формуле:

$$k_{OB} = \sqrt{\sum_{i=1}^N |T_{niOB\_П}|^2} / T_{n100\_НП}, \quad (3)$$

где  $T_{niOB\_П}$  – амплитуда  $i$ -й оборотной гармоники тензора магнитного натяжения в спектре сигнала датчика вибрации поврежденного АД, а  $T_{n100\_НП}$  – амплитуда гармоники частоты 100 Гц в спектре сигнала датчика вибрации неповрежденного АД.

Числитель в формуле (3) представляет собой СКЗ совокупности оборотных гармоник, которые появляются в спектре поврежденного АД. Уровень вибрации АД изменяется не только за счет основной оборотной гармоники (ее частота равна частоте вращения ротора), но и за счет множества гармоник, частоты которых являются кратными частоте основной оборотной гармоники. В спектре вибраций неповрежденного АД оборотные гармоники отсутствуют. Поэтому для получения коэффициента в безразмерной форме базовой величиной принята амплитуда основной гармоники электромагнитных колебаний частотой 100 Гц в спектре вибраций неповрежденного АД.

4. Коэффициент боковых оборотных гармоник  $k_{OB\_Б}$ , который характеризует отношение СКЗ совокупности боковых (правых и левых) оборотных гармоник, располагающихся около оборотных гармоник [1, 2], к амплитуде гармоники частоты 100 Гц неповрежденного АД и рассчитывается по формуле:

$$k_{OB\_Б} = \sqrt{\sum_{i=1}^N |T_{niOB\_Б\_П}|^2} / T_{n100\_НП}, \quad (4)$$

где  $T_{niOB\_Б\_П}$  – амплитуда  $i$ -й боковой оборотной гармоники в спектре сигнала датчика вибрации поврежденного АД, а  $T_{n100\_НП}$  – амплитуда гармоники частоты 100 Гц в спектре сигнала датчика вибрации неповрежденного АД.

Коэффициенты  $k_{OB}$  и  $k_{OB\_Б}$  являются составляющими общего коэффициента  $k_{СКЗ\_а}$ . Целесообразность выделения и отдельного анализа коэффициентов  $k_{OB}$  и  $k_{OB\_Б}$  заключается в том, что при появлении повреждений в спектрах появляются оборотные и боковые оборотные гармоники, амплитуды которых непосредственно связаны со степенью развития повреждения.

5. Коэффициент изменения гармоники частоты 100 Гц  $k_{100}$ , который характеризует отношение амплитуды гармоники частоты 100 Гц по-

врежденного АД к амплитуде гармоники частоты 100 Гц неповрежденного АД и рассчитывается по формуле:

$$k_{100} = T_{n100\_П} / T_{n100\_НП}, \quad (5)$$

где  $T_{n100\_П}$  – амплитуда гармоники тензора натяжения частоты 100 Гц в спектре сигнала датчика вибрации поврежденного АД, а  $T_{n100\_НП}$  – амплитуда гармоники частоты 100 Гц в спектре сигнала датчика вибрации неповрежденного АД.

6. Коэффициент изменения зубцовой гармоники  $k_z$ , который характеризует отношение амплитуды первой зубцовой гармоники поврежденного АД к амплитуде первой зубцовой гармоники неповрежденного АД и рассчитывается по формуле:

$$k_z = T_{nz\_П} / T_{nz\_НП}, \quad (6)$$

где  $T_{nz\_П}$  – амплитуда первой зубцовой гармоники тензора натяжения в спектре сигнала датчика вибрации поврежденного АД, а  $T_{nz\_НП}$  – амплитуда первой зубцовой гармоники в спектре вибрации неповрежденного АД. Частоты зубцовых гармоник в сигнале датчика связаны с числом зубцов и скоростью вращения ротора и определяются по формуле  $f_{zk} = k f_{OB} Z_2$ , где  $f_{OB}$  – частота вращения ротора, а  $Z_2$  – число зубцов ротора,  $k = 1, 2, \dots$  При  $k = 1$  имеем первую зубцовую гармонику. Для АД-5000  $f_{z1} = 2,3$  кГц.

7. Коэффициент изменения постоянной составляющей  $k_0$ , который характеризует отношение постоянных составляющих электромагнитных сил притяжения между статором и ротором в поврежденном и неповрежденном АД и рассчитывается по формуле:

$$k_0 = T_{n0\_П} / T_{n0\_НП}, \quad (7)$$

где  $T_{n0\_П}$  – постоянная составляющая спектра тензора натяжения поврежденного АД, а  $T_{n0\_НП}$  – постоянная составляющая спектра тензора натяжения неповрежденного АД. Следует подчеркнуть, что постоянно действующая составляющая силы магнитного притяжения между статором и ротором реально существует в АД, причем ее величина изменяется при появлении повреждения ротора. Это создает предпосылки для анализа указанной силы при диагностике повреждений АД. Хотя пьезоэлектрические датчики виброускорения непосредственно не измеряют постоянную составляющую усилий, но за счет калибровки полученного сигнала таким образом, чтобы его минимальное значение принималось равным нулю, можно после спектрального анализа получен-





ного сигнала экспериментально определить его постоянную составляющую.

**Правила диагностики дефектов ротора АД на основе системы диагностических признаков.** Проведенные исследования позволили выявить характерные изменения, возникающие как во временных распределениях сигналов датчиков вибрации, так и в их спектрах при появлении различных видов повреждений ротора АД. Это позволяет сформулировать диагностические признаки и соответствующие правила диагностики, которые позволяют идентифицировать конкретные виды повреждений с достаточной достоверностью.

Диагностические признаки разделяются на основные и дополнительные (Табл. 1). *Основные диагностические признаки* характеризуют изменения, возникающие в спектрах сигнала датчика вибрации при появлении повреждений в АД. В частности фиксируются и анализируются новые составляющие спектров, которых нет в спектрах неповрежденного АД.

Дополнительные диагностические признаки основаны на анализе временных зависимостей сигналов датчика вибрации и используются в тех случаях, когда основные диагностические признаки не дают точной характеристики повреждения и могут указывать на несколько разных видов повреждения (например, поврежден стержень или СКК).

Как основные, так и дополнительные диагностические признаки получены в результате математического моделирования повреждений АД с помощью представленной полевой математической модели.

Сформулированная совокупность основных и дополнительных диагностических признаков представляет собой упорядоченную непротиворечивую систему правил диагностики, которая позволяет идентифицировать конкретный вид повреждений ротора АД, легко алгоритмизируется и закладывается в компьютеризированную базу знаний системы вибрационной диагностики.

Таблица 1. Система диагностических признаков

Основные диагностические признаки, определяемые при анализе спектра:		
1		Наличие первой и высших гармоник частоты вращения с их боковыми гармониками в спектре сигнала датчика поврежденного АД свидетельствует о повреждении или стержней или СКК КЗОР.
2		Наличие в спектре существенной второй гармоники частоты вращения при малой первой гармонике, указывает на пространственный сдвиг между поврежденными стержнями. При угле сдвига $\alpha = 180^\circ$ первая гармоника частоты вращения отсутствует, а вторая гармоника явно выражена. Отклонение величины коэффициента $k_{OB}$ от максимального значения, определенного для компактной группы поврежденных стержней, свидетельствует о пространственном сдвиге между поврежденными стержнями.
3		Наличие в спектре сигнала датчика поврежденного АД первой и высших гармоник частоты вращения без их боковых гармоник при увеличении общего уровня вибраций (коэффициент $k_{СКЗ a}$ растет) свидетельствует о существовании ДЭ. О наличии ДЭ свидетельствует также увеличение амплитуд зубцовых гармоник.
4		Отсутствие в спектре сигнала датчика вибрации поврежденного АД гармоник частоты вращения и их боковых гармоник на фоне увеличения общего уровня вибрации указывает на наличие СЭ. На наличие СЭ указывает также изменение амплитуд зубцовых гармоник при перемещении датчика вдоль поверхности статора АД.
Дополнительные диагностические признаки, определяемые при анализе временных зависимостей сигнала датчика:		
1		Наличие во временном сигнале датчика вибрации пика "сигнала повреждения", расположенного между двумя смежными максимумами, свидетельствует о повреждении стержней КЗОР.
2		Наличие во временном сигнале датчика вибрации пика "сигнала повреждения", расположенного на вершине одного из максимумов сигнала, свидетельствует о повреждении СКК.
3		Изменение амплитуд зубцовых гармоник за время одного оборота ротора АД указывает на наличие ДЭ.



**Диагностика повреждений ротора АД на основе системы диагностических коэффициентов.** Вибрационная диагностика АД базируется на использовании системы диагностических признаков, которые отражают качественные изменения, появляющиеся в вибрациях двигателя при появлении повреждений его конструкции. Поэтому выбор и обоснование системы диагностических признаков является важной составляющей построения системы вибродиагностики. Диагностические признаки позволяют определить наличие повреждения и идентифицировать его вид по результатам анализа временного распределения сигнала датчика или составляющих его спектра.

Но в мощных АД определения факта повреждения на основе проявления диагностических признаков недостаточно, поскольку при этом с необходимой точностью невозможно определить степень развития и характер повреждения КЗОР. Например, при разрыве в АД 1-го или 3-х стержней диагностические признаки будут подобными, но глубина повреждения обмотки и рекомендации относительно сроков проведения ее ремонта будут существенно отличаться. Поэтому актуальным является разработка и использование системы диагностических коэффициентов, которые позволяют провести количественную оценку и сравнение степени повреждения КЗОР с учетом различных вариантов повреждений. При наличии такой системы диагностических коэффициентов диагностика включает в себя не только качественный анализ характера повреждений на основе диагностических признаков, но и количественный анализ степени развития повреждения на основе численных значений диагностических коэффициентов. Такой подход к вибрационной диагностике повышает ее достоверность и расширяет функциональные возможности.

Сформулированные в предыдущем пункте правила диагностики на основе системы диагностических признаков являются необходимой, но недостаточной системой правил, которая не может удовлетворить всем требованиям, предъявляемым к процессу достоверной диагностики. В частности, она не дает количественной оценки степени повреждения, например, количества поврежденных стержней КЗОР, величины эксцентриситета, что особенно важно при выявлении начальной стадии повреждения. Такую оценку дают правила диагностики повреждений ротора АД, базирующиеся на системе введенных выше числовых диагностических коэффициентов.

Совокупность числовых значений расчетных диагностических коэффициентов, определяемых по формулам (1) – (7), рассчитывается для раз-

личных видов и объемов повреждений ротора и может быть обобщенно представлена в виде таблиц. Таблицы диагностических коэффициентов устанавливают взаимно однозначное соответствие между численными значениями диагностических коэффициентов, видом и объемом повреждения ротора АД. Эти таблицы предварительно разрабатываются для конкретных АД, подлежащих мониторингу, и формируют соответствующую базу знаний, входящую в состав системы диагностики.

*Алгоритм построения таблиц расчетных диагностических коэффициентов* для конкретного двигателя включает в себя следующие этапы.

1. В одном из программных пакетов, предназначенных для моделирования электромагнитного поля (например, Comsol Multiphysics), разрабатывается конечно-элементная модель, численно реализующая представленную выше математическую модель. В частности:

1.1. Строится геометрия расчетной зоны АД, задаются физические параметры различных материалов (электропроводности, магнитные проницаемости, для сердечников – кривые намагничивания и т.д.), задаются источники поля (токи в обмотке статора).

1.2. Выбирается поверхность, которая вращается (ротор относительно неподвижного статора).

1.3. На поверхности зубца статора выбирается точка условного расположения датчика вибрации (датчика виброускорения).

1.4. Задается вид повреждения ротора АД (стержни, СКК, эксцентриситет).

2. Решается задача расчета электромагнитного поля в режиме Time-Harmonic или Time-dependent.

3. В точке условного расположения датчика вибрации для интервала времени, соответствующего одному обороту ротора, рассчитывается нормальная составляющая тензора магнитного натяжения  $T_n$ , которая в определенном масштабе отражает сигнал датчика на одном полном обороте ротора.

4. Используя методику численного моделирования сигнала датчика виброускорения на полном периоде амплитудно-фазовой модуляции "сигнала повреждения", рассчитывается сигнал датчика вибрации на всем периоде модуляции.

5. Выполняется спектральная обработка полученного расчетного сигнала.

6. По формулам (1)–(7) вычисляются расчетные диагностические коэффициенты для конкретного вида повреждения АД.



7. Расчетный процесс в зависимости от вида повреждения полностью или частично повторяется для другого варианта повреждения АД.

По результатам проведенных исследований представлена таблица (Табл. 2.) диагностических коэффициентов для мощного двигателя типа АД-5000 при различных вариантах повреждений ротора. В Табл. 2 представлены различные варианты повреждений ротора, в том числе разрыв нескольких стержней КЗОР, разрыв двух стержней, смещенных друг относительно друга на различный угол, разрыв СКК, наличие СЭ и ДЭ.

Указанные коэффициенты рассчитаны не только для различных вариантов повреждений ротора, но и для разных объемов повреждений, причем в таблицах рассмотрены варианты повреждений, которые характерны для начальной стадии развития дефектов, например, когда количество поврежденных стержней ротора равно 1 ... 3 и лежит в диапазоне (1,6 ... 6,6)% от общего количества стержней КЗОР. Эти варианты повреждений являются наиболее интересными и важными для диагностики, поскольку их своевременное выявление позволяет предотвратить дальнейшее аварийное разрушение АД. При большей степени повреждения, например, при большем количестве поврежденных стержней КЗОР, вибрации двигателя становятся недопустимо большими, и АД подлежит срочной аварийной остановке. Результаты расчетов для случая статического эксцентриситета отвечают сигналу датчика, размещенного в зоне наименьшего воздушного зазора АД. При этом предполагается, что конфигурация воздушного зазора известна заранее, что исключает необходимость применения двух датчиков с целью предотвращения их расположения в двух разных точках с одинаковыми воздушными зазорами. Для неповрежденного АД рассматриваемые коэффициенты равны 1 или 0.

Из Табл. 2 можно сделать следующие выводы.

1. При увеличении количества поврежденных стержней КЗОР общий уровень вибраций (коэффициенты  $k_{СКЗ_а}$ ,  $k_{СКЗ_в}$ ) увеличивается. При этом вибрации на частоте 100 Гц уменьшаются, что объясняется искажением магнитного поля в воздушном зазоре и, как следствие, уменьшением амплитуды первой гармоники индукции, которая и вызывает вибрации на частоте 100 Гц. Рост же суммарных вибраций при поврежде-

нии КЗОР объясняется появлением гармоник частоты вращения и их боковых гармоник (коэффициенты  $k_{ОБ} > 0$  и  $k_{ОБ_Б} > 0$ ).

2. При увеличении угла сдвига между двумя поврежденными стержнями общий уровень вибраций уменьшается (по отношению к вибрации в случае повреждения двух расположенных рядом стержней КЗОР). При двух поврежденных стержнях, которые расположены под углом  $\alpha = 180^\circ$ , коэффициенты  $k_{ОБ}$  и  $k_{ОБ_Б}$  не равны нулю, что объясняется их расчетом как СКЗ совокупности всех гармоник частоты вращения и их боковых гармоник.

3. Повреждение одного сегмента короткозамыкающего кольца вызывает большие вибрации, чем повреждение одного стержня.

4. Диагностический коэффициент  $k_{СКЗ_в}$  является наиболее чувствительным из всех коэффициентов к появлению любых видов повреждений.

5. При наличии СЭ коэффициент  $k_{СКЗ_в}$  становится меньше единицы, что объясняется уменьшением амплитуды гармоники 100 Гц, которая является наибольшей в спектре виброскорости. При повреждении КЗОР уровень вибраций от зубцовых гармоник практически не изменяется (коэффициент  $k_z$ ), но вклад зубцовых гармоник существенно возрастает при наличии СЭ и ДЭ. Этот признак также можно использовать при диагностике для разделения повреждений КЗОР и появления эксцентриситета.

6. При любых повреждениях ротора постоян-

Таблица 2. Диагностические коэффициенты АД-5000

Вид повреждения	Диагностические коэффициенты						
	$k_{СКЗ_а}$	$k_{СКЗ_в}$	$k_0$	$k_{100}$	$k_z$	$k_{ОБ}$	$k_{ОБ_Б}$
Неповрежденный АД	1	1	1	1	1	0	0
Поврежден 1 стержень	1,05	1,07	1,06	0,94	1	0,23	0,15
Повреждены 2 стержня рядом	1,45	1,77	1,21	0,83	1	0,73	0,48
Повреждены 3 стержня рядом	2,47	3,31	1,36	0,72	1	1,50	1,01
Повреждены 2 стержня, смещенные на угол 46,9°	1,21	1,33	1,18	0,96	1	0,46	0,22
Повреждены 2 стержня, смещенные на угол 86,1°	1,16	1,25	1,15	0,92	1	0,39	0,10
Повреждены 2 стержня, смещенные на угол 180°	1,09	1,14	1,12	0,89	1	0,23	0,05
Поврежден 1 СКК	1,39	1,23	1,10	0,97	1	0,44	0,32
Повреждены 2 СКК	1,47	1,35	1,15	0,94	1	0,51	0,36
СЭ, $\varepsilon = 0,26$	1,07	0,95	1,23	0,90	1,77	0	0
СЭ, $\varepsilon = 0,52$	1,66	0,85	1,75	0,84	3,85	0	0
ДЭ, $\varepsilon = 0,26$	1,12	1,16	1,03	1,04	1,19	0,25	0
ДЭ, $\varepsilon = 0,52$	1,26	1,57	1,07	1,12	1,77	0,55	0



ная составляющая спектров (коэффициент  $k_0$ ) всегда увеличивается, что объясняется уменьшением сил электродинамического отталкивания обмоток статора и ротора вследствие повреждения КЗОР и увеличением силы магнитного притяжения между ротором и статором.

#### Выводы.

1. Разработаны методология и основы научно-методического обеспечения для систем вибрационного контроля и диагностики повреждений роторов мощных АД. Совокупность диагностических признаков, указанных в Табл. 1, и коэффициентов является важной составляющей системы вибродиагностики.

2. Сформулированы правила диагностики повреждений ротора АД на основе системы диагностических признаков, которые позволяют установить соответствие между видом повреждения и изменением временных и спектральных характеристик сигналов датчиков вибраций. Диагностические признаки позволяют определить наличие повреждения и идентифицировать его вид по результатам анализа временного распределения сигнала датчика или составляющих его спектра.

3. Разработана методика диагностики повреждений ротора АД на основе системы диагностических коэффициентов, которая позволяет определить степень развития каждого вида повреждения. Совместное использование в процессе диагностики системы диагностических признаков и системы диагностических коэффициентов существенно повышает достоверность диагностики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васьковский Ю.Н., Гераскин А.А. Анализ сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях на основе математических моделей вибровозмущающих электромагнитных сил // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – Вип. 5. – С. 12–16.

2. Васьковский Ю.Н., Гераскин А.А. Математическое моделирование электромагнитных полей в короткозамкнутом асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – Вип. 2. – С. 56–61.

3. Загірняк М.В., Мамчур Д.Г., Калінов А.П., Чумачова А.В. Диагностика асинхронних двигунів на основі аналізу спектра споживаної потужності. – Кременчук: ПП Шербатих О.В., 2013. – 224 с.

4. Zhen, D., Wang, T., Gu, F., and Ball, A.D. (2013), "Fault diagnosis of motor drives using stator current signal analysis based on dynamic time warping", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 34, no 1, pp. 191–202.

5. Тутко А.И., Кучинский, В.Л. Ахременко, Е.П. Осадчий. Влияние несимметричных температурных полей на вибрационное состояние ротора ЭМ // *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. – 2006. – № 3. – С. 33–40.

