

**ДИАГНОСТИКА НАСОСНОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЦЕПИ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Баширов М.Г., Сайфутдинов Д.М., Филимошкин В.А.,  
Баширова Э.М.

*Салаватский филиал Уфимского государственного  
нефтяного, технического университета, Салават*

В оборудовании предприятий нефтегазовой отрасли с механически движущимися частями наибольший удельный вес имеет насосное оборудование. Около 24-30% аварийных остановок данного оборудования происходит по причине выхода из строя подшипников электродвигателей привода агрегатов и исполнительных механизмов из-за дефектов тел качения, эксцентриситета тел вращения, нарушения нормальных условий эксплуатации всего агрегата. Современные средства диагностики, в основном вибродиагностики, основанные на измерении и анализе параметров вибрации - амплитуды или скорости - на корпусах подшипников в трёх направлениях: вертикальном, поперечном горизонтальном, продольном (осевом). При контроле вибрации по амплитуде максимальное значение размаха, полученное по всем трём направлениям, сравнивают с нормативными допустимыми значениями и устанавливают вибрационное состояние агрегата. При этом в приборы такого типа необходимо вносить дополнительные данные, такие как: номер и серия подшипника, скорость вращения роторов, мощность приводного двигателя, и т.п. Также используются акустические методы анализа состояния подшипника, например метод ударных импульсов, разработанный фирмой SPM (Швеция), основанный на исследовании шумового сигнала в зоне контакта тел качения и скольжения подшипника. Все приборные средства, в которых используются указанные методы, не претерпели существенных изменений по методикам диагностики, развитие получили сервисные качества приборов. Новым направлением в области диагностики насосного оборудования является анализ электромагнитных полей приводного электродвигателя. Ярким представителем данного направления является концерн CSI (США), разработавший систему диагностики приводных электродвигателей механизмов MotorStatus. Электромагнитные параметры обмоток статора и ротора являются богатым источником информации о состоянии электродвигателя и неисправности вносят изменения в их структуру, что проявляется в искажении электромагнитного поля электрической машины. Системы такого типа пока недостаточно совершенны и в настоящее время разработаны методики определения небольшого количества неисправностей только электродвигателей, но достоверность информации намного выше, чем у средств вибродиагностики. Автоматизированные испытательно - диагностирующие системы для контроля качества асинхронных электродвигателей в настоящее время начали применяться при приеме - сдаточных испытаниях на электромашиностроительных заводах [9]. Для определения бракованной продукции используется метод расчета, позволяющий определить допустимые значения показателей холо-

стого хода и короткого замыкания, причем данный метод применим только для определенного типоразмера двигателей.

Наиболее достоверные данные дают электрические параметры статорной и роторной обмоток электрических машин. Зная форму подведенного к выводу машины напряжения, можно определить гармонический состав поля в воздушном зазоре. В установившемся режиме основной источник высших временных гармоник — несинусоидальное напряжение на выводах машины. В реальных машинах в воздушном зазоре, наряду с основной гармоникой имеется бесконечное число гармоник поля. Для исследования систем с постоянной структурой силовой цепи, когда известно аналитическое выражение для возмущающего воздействия, успешно применяется метод гармонического анализа [8]. Удобство этого метода состоит в том, что полупроводниковый преобразователь заменяется источником несинусоидальной ЭДС и выходные параметры системы легко определяются с помощью гармонических составляющих из соответствующих схем замещения асинхронной машины. При этом отпадает необходимость решения огромного количества систем уравнений многофазной асинхронной машины, а сам расчёт может быть выполнен при помощи современных интегрированных систем автоматизации математических расчетов, например MATLAB V.6.0, MATHCAD 2000 PRO.

Если сеть автономная и мощность двигателя соизмерима с мощностью генератора, как это имеет место при подключении двигателя через преобразователь частоты или устройства плавного пуска, то несинусоидальность поля в воздушном зазоре приведет к появлению на выводе машины несинусоидального напряжения, и токи высших гармоник будут замыкаться через нагрузку. Второй источник временных гармоник в воздушном зазоре [3] — вал — механический выход машины. При нелинейном изменении момента нагрузки  $M_c$ , или частоты вращения  $n$ , как это имеет место при наличии дефектов в телах вращения электродвигателя, в воздушном зазоре появляются высшие гармоники, которые из зазора «выходят» на электрический вывод и искажают напряжение сети. Нелинейность момента нагрузки на валу двигателя сильно влияет на индуктивность его обмоток, в результате чего вносятся существенные фазовые сдвиги в передаваемый гармонический сигнал преобразователя [7].

Высшие временные гармоники могут образоваться в воздушном зазоре из - за теплового дисбаланса электрической машины («прийти» с теплового вывода). При нелинейном изменении температуры среды, окружающей электрическую машину, а также при наличии высших гармоник в силовой части системы Т(Т)П-АД, в воздушном зазоре появляются высшие гармоники и магнитное поле искажается.. Данный вопрос актуален при анализе и синтезе системы «тиристорный преобразователь - асинхронный двигатель», причём независимо от способа реализации режима управления двигателем - частотное управление, управление по напряжению, по току и т.п. - вопрос оптимизации теплового баланса системы остаётся открытым..

Для описания процессов преобразования энергии в электрической машине с бесконечным числом гармоник и бесконечным числом контуров на статоре и роторе используется математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя [1, 2]. Уравнения обобщенного электромеханического преобразователя в символической форме выглядят следующим образом:

$$[U]=[Z] [I], M_{эм}=M [I_s I_r],$$

где  $[U]$  и  $[I]$  - субматрицы напряжений и токов.

включающие напряжения и токи в т и п обмотках статора и ротора по осям *бив*;  $[Z]$  - сложная матрица сопротивлений;  $[I_s I_r]$  - бесконечное число пар произведений токов в обмотках статора и ротора.

Активные сопротивления, индуктивности и взаимные индуктивности обмоток, а также момент инерции  $J$  - это коэффициенты перед зависимыми переменными в уравнениях электромеханического преобразователя, называемые параметрами электрической машины. Уравнения, описывающие процессы в большинстве электрических машин, можно получить, преобразуя уравнения обобщенного электромеханического преобразователя. Для этого необходимо, зная форму поля в воздушном зазоре, разложить в гармонический ряд МДС, составить расчетную схему машины с необходимым числом обмоток с соответствующими амплитудами и частотами напряжений [2].

На основании проведенных ранее исследований системы «тиристорный (транзисторный) преобразователь – асинхронный двигатель» [7, 8, 9] и полученных экспериментальных данных исследований системы Т(Т)П-АД было установлено появление в амплитудно-частотных характеристиках системы характерных спектров и проведена их идентификация:

- при появлении дефектов в опорах качения агрегатов, а именно: снижение количества смазки и дефекты подшипников качения, происходит появление пиковых значений в спектре, в области низких частот, обусловленный увеличением индуктивности обмоток двигателя при действии характерного для этих неисправностей моментов сил на вал двигателя;

- при расцентровке валов приводного двигателя и приводимого в движение механизма и эксцентриситете роторов происходит рост амплитудных значений на первой (основной) гармонике амплитудно-частотной характеристики, обусловленный деформацией электромагнитного поля электродвигателя.

Как указывалось выше, параметры электрических машин могут быть сравнительно легко определены расчетно-экспериментальным способом и в механических системах типа центробежных насосов с управляемым электроприводом, имеющих жесткую или упругую связь между вращающимися частями, оценку текущего состояния и прогнозирования остаточного ресурса насосных агрегатов можно производить с использованием связи между изменениями параметров электрической машины и изменениями эксплуатационных свойств агрегата. Корреляционная связь между эксплуатационными свойствами агрегата и параметрами электродвигателя может быть представлена моделью вида:

$$CY = DX, \quad (2)$$

где  $Y$  -  $n$  - мерный вектор контролируемых эксплуатационных свойств;  $X$  -  $m$ -мерный вектор параметров электродвигателя;  $C$  и  $D$  - матрицы постоянных коэффициентов - параметров модели.

Эксплуатационные свойства агрегата в математических моделях могут выражаться параметрами, такие как нелинейные изменения момента нагрузки, частоты вращения, температуры, изменения параметров вибрации вследствие возникновения дефектов подшипников, деформирование валов, ухудшения условий смазки, поврежденных обмоток статора и ротора, несоосность валов двигателя и приводимого в движение механизма и т. д.

Для оценки состояния и прогнозирования остаточного ресурса насосного оборудования при наличии большого количества связанных между собой параметров, характеризующих эксплуатационные свойства, целесообразно применение многопараметровой метрической модели [3]. В качестве диагностических параметров оборудования могут быть использованы изменения параметров гармонических составляющих спектра электромагнитного поля двигателя или соответствующие изменения параметров гармонических составляющих тока статора. Из параметров гармонических составляющих формируется признаковое пространство. Измеренные параметры  $p$  гармонических составляющих, соответствующих текущему состоянию оборудования, представляются векторами

$$(V_1; V_2; \dots; V_p). \quad (3)$$

Состояние оборудования в многомерном пространстве описывается результирующим вектором  $V$ , который представляет собой сумму векторов типа (3):

$$V = [A(m), B(n), C(l)], \quad (4)$$

где  $A(m)$ ,  $B(n)$ ,  $C(l)$  - соответственно, параметры гармонических составляющих электромагнитного поля или тока статора. параметры, характеризующие эксплуатационные свойства, и структура связей между ними.

В соответствии с теорией распознавания образов, техническое состояние оборудования и остаточный ресурс идентифицируются как функции отклонения вектора текущего состояния от вектора эталонной модели  $V_0$  и расстояния до поверхности предельного состояния  $S_{\Pi}$  [4, 5].

Литература

1. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1983.-256 с.
3. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа. 1994. - 456с.
4. Аронов А. Я. Пути статистического решения метрических задач многопараметрового электромагнитного неразрушающего контроля /Дефектоскопия. - 1984. - № 5. - С. 71-76.
5. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.. Машиностроение, 1984. - 312с.
6. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. - 240 с.
7. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода/ Л. П. Петров, О.

А. Андрищенко, В. И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200с.

8. Глазенко Т. А., Хирсанов В. И. Полупроводниковые системы импульсного асинхронного электропривода малой мощности. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1983. – 176с.

9. Гольдберг О. Д. И др. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей/О. Д. Гольдберг, И. М. Абдуллаев, А. Н. Абиев; Под ред. О. Д. Гольдберга – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160с.

### ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Баширов М.Г., Ишмухаметов В.С., Рогачев Ю.Н., Баширова Э.М.

*Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Салават, Филиал Академии наук республики Башкортостан, Стерлитамак*

В процессе эксплуатации высокорискового нефтегазового оборудования происходит деградация некоторых важных свойств материалов. В действующих нормативно-технических документах при расчете остаточного ресурса оборудования не учитывается уровень деградации материалов и конструкций, что существенно снижает достоверность прогноза. Обеспечение безопасной эксплуатации оборудования возможно только на основе получения и анализа объективных инструментальных данных о фактическом состоянии материалов и конструкций. Механические и электрофизические свойства материалов «закладываются» на уровне структуры и взаимосвязаны. Все изменения в структуре материала в процессе деформирования-разрушения, зарождение и развитие микроразрушений отражаются в соответствующих изменениях электрофизических параметров. Изменения электрофизических параметров материала могут быть измерены электромагнитными методами и использованы для оценки текущего технического состояния и ресурса оборудования. Механическим критериям предельных нагрузок и деформаций оборудования соответствуют электрофизические критерии предельного состояния.

В системе электромагнитный преобразователь – объект контроля параметры электрических сигналов обмоток связаны через электрофизические и геометрические параметры объекта контроля. Эта связь в операторной форме может быть записана как

$$W(p) = y(p)/x(p), (1)$$

где  $W(p)$  называется передаточной функцией объекта контроля;

$y(p)$  – преобразованный по Лапласу сигнал в измерительной обмотке;

$x(p)$  – преобразованный по Лапласу сигнал в обмотке возбуждения.

Анализ передаточной функции позволяет оценить уровень деградации материала оборудования. Метод, основанный на анализе передаточной функции, может быть использован для оценки степени ус-

талостного повреждения путем определения изменения ферритной фазы в аустенитных сталях в процессе пластической деформации. Изменение количества ферритной фазы в аустенитных метастабильных материалах обусловлено трансформацией кристаллической гамма-решетки аустенита в альфа- и дельта-феррит под действием циклической нагрузки. Происходящие на микроуровне изменения структуры материала носят аддитивный характер в течение эксплуатации и в результате становятся инициаторами макроразрушения элемента при его нагружении. Моделируя данный процесс локальным нагружением материала вдавливанием шарового индентора, по скорости прироста ферритной фазы в зависимости от величины нагрузки в процессе деформирования можно оценить накопленную усталость элемента в данном месте. Для измерения ферритной фазы при вдавливании используется электромагнитный преобразователь, совмещенный в одном блоке с инденторным узлом [2].

Литература

1 Пат. 2204131 RU, МКИ 7 G 01N 27/90. Электромагнитный преобразователь / И.Р. Кузеев., М.Г. Баширов, Н.М. Захаров, Г.И. Евдокимов, Э.М. Баширова // О. И. П. М. – 2003. - № 13.

2 Абаган А.А., Бакиров М.Б., Камышников О.Г. и др. Опыт продления срока службы энергоблоков с РУ ВВЭР-440 первого поколения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2003. - № 10. - С. 49 – 56.

### РАЗРАБОТКА ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Баширова Э.М., Заварихин Д.А., Захаров А.В., Яковлев В.К.

*Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, Салават; филиал Академии наук республики Башкортостан, Стерлитамак*

Исследования взаимосвязи механических и электрофизических свойств конструкционных сталей являются весьма актуальными. Нарботки в этой области представляют существенный интерес для специалистов неразрушающего контроля при установлении закономерностей изменения прочностных характеристик конструкционных сталей и их электрофизических свойств [1].

Для проведения исследований механических и электрофизических свойств конструкционных сталей при растяжении были разработаны опытные образцы и измерительные преобразователи.

Опытные образцы были разработаны на основе образцов согласно ГОСТ 1497-84, отличающиеся тем, что сечение образца постоянно по всей длине. Крепление образца в захватах осуществляется за счет резьбового соединения. В средней части образца нанесен концентратор напряжений в виде проточки необходимый для локализации зоны контроля измеряемых величин. На основании проведенных расчетов на