

УДК 620.179.14

М.Г. Баширов, Д.М. Сайфутдинов
 Уфимский государственный нефтяной технический университет
 филиал в городе Салавате, Россия

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ ДИАГНОСТИКИ

Основой для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования служит комплекс мер, применяемых на стадиях проектирования, монтажа и эксплуатации. Системы диагностирования позволяют выявлять и устранять скрытые дефекты на стадиях приработки и эксплуатации. Как показывает мировая практика, более 25 % аварийных остановок насосно-компрессорного оборудования происходит из-за выхода из строя подшипников электродвигателей привода агрегатов.

Рассмотрим трехфазную идеализированную двухполюсную машину, которая имеет гладкий воздушный зазор, все параметры ее линейные, а напряжения на выводах синусоидальные [1, 2]. В модели машины имеются три обмотки на статоре с числом витков w_A, w_B, w_C и три обмотки на роторе с числом витков w_a, w_b, w_c соответственно. Для трехфазной машины в системе фазных координат A, B, C, a, b, c дифференциальные уравнения фазных напряжений имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= R_A i_A + d\Psi_A/dt; & u_B &= R_B i_B + d\Psi_B/dt; \\ u_C &= R_C i_C + d\Psi_C/dt; & u_a &= R_a i_a + d\Psi_a/dt; \\ u_b &= R_b i_b + d\Psi_b/dt; & u_c &= R_c i_c + d\Psi_c/dt, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J} (M_3 - M_c), \quad (2)$$

где u_i — напряжения ($i=A, B, C, a, b, c$); i_i — токи; R_i — активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора; Ψ_i — результирующие потокосцепления.

Потокосцепление для фазы A

$$\dot{\Psi}_A = L_A \dot{i}_A + M_{AB} \dot{i}_B + M_{AC} \dot{i}_C + M_{Aa} \dot{i}_a + M_{Ab} \dot{i}_b + M_{Ac} \dot{i}_c. \quad (3)$$

Аналогично записываются потокосцепления для пяти других контуров. В естественных координатах индуктивности и взаимные

индуктивности в потокосцеплениях (3) — периодические коэффициенты, изменяющиеся по гармоническому закону при вращении ротора машины. Уравнения (1) и (2) после подстановки в них выражений результирующих потокосцеплений имеют громоздкие решения с несколькими десятками членов, содержащих периодические коэффициенты. Чтобы избавиться от периодических коэффициентов, необходимо перейти к заторможенной системе координат α, β, γ . В трехфазной системе координат a, β, γ в воздушном зазоре поле круговое и его можно представить результирующими векторами [2].

Проецируя результирующие вектора токов ротора, напряжений и потокосцеплений на оси a, β, γ статора, находят выражения для преобразованных значений. Матрица преобразований для трехфазной системы:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta+\rho) & \frac{2}{3}\cos(\theta-\rho) \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{3}\cos(\theta-\rho) & \frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta+\rho) \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{3}\cos(\theta+\rho) & \frac{2}{3}\cos(\theta-\rho) & \frac{2}{3}\cos\theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $p=2\pi/3$.

В трехфазной системе координат могут быть записаны уравнения с учетом нелинейности параметров, несинусоидальности питания и т. д. Используя матрицу преобразования (4), можно записать уравнения (1) в преобразованной трехфазной системе координат:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= r_{s\alpha} i_{s\alpha} + d\Psi_{s\alpha}/dt; \\ u_{s\beta} &= r_{s\beta} i_{s\beta} + d\Psi_{s\beta}/dt; \\ u_{s\gamma} &= r_{s\gamma} i_{s\gamma} + d\Psi_{s\gamma}/dt; \\ -u_{r\alpha} &= r_{r\alpha} i_{r\alpha} + d\Psi_{r\alpha}/dt + (\Psi_{r\beta} - \Psi_{r\gamma}) \omega_r / \sqrt{3}; \\ -u_{r\beta} &= r_{r\beta} i_{r\beta} + d\Psi_{r\beta}/dt + (\Psi_{r\gamma} - \Psi_{r\alpha}) \omega_r / \sqrt{3}; \\ -u_{r\gamma} &= r_{r\gamma} i_{r\gamma} + d\Psi_{r\gamma}/dt + (\Psi_{r\alpha} - \Psi_{r\beta}) \omega_r / \sqrt{3}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для трехфазной машины электромагнитный момент и электромагнитная энергия соответственно:

$$M_s = p \frac{\partial W_s}{\partial \theta}; \quad (6)$$

$$W_3 = \frac{1}{2} (\Psi_{s\alpha} i_{s\alpha} + \Psi_{s\beta} i_{s\beta} + \Psi_{sy} i_{sy} + \Psi_{r\alpha} i_{r\alpha} + \Psi_{r\beta} i_{r\beta} + \Psi_{ry} i_{ry}). \quad (7)$$

После подстановки выражений токов в уравнения машины в трехфазных заторможенных координатах:

$$M_3 = p \frac{\sqrt{3}}{2} M [(i_{s\alpha} i_{ry} + i_{s\beta} i_{r\alpha} + i_{sy} i_{r\beta}) - (i_{s\alpha} i_{r\beta} + i_{s\beta} i_{r\gamma} + i_{sy} i_{r\alpha})]. \quad (8)$$

Выражение (8) содержит все возможные пары произведений токов для трехфазной машины, определяющие значение электромагнитного момента. Система уравнений напряжения и движения описывает процессы электромеханического преобразования энергии в трехфазной машине.

В реальных машинах в воздушном зазоре наряду с основной гармоникой имеется бесконечное число гармоник поля. Эти гармоники имеют частоты выше и ниже основной, но принято называть их высшими гармониками. Высшие гармоники делят на временные и пространственные. Временные — гармоники, которые попали в воздушный зазор машины со стороны выводов машины. Пространственные — гармоники, появившиеся из-за конструктивных особенностей и нелинейности параметров машины.

Если рассматривать электрическую машину как шестиполюсник, то можно считать, что временные гармоники попадают в воздушный зазор со стороны электрической сети, со стороны вала — механического вывода, а также со стороны теплового вывода.

В установившемся режиме основной источник высших временных гармоник — несинусоидальное напряжение на выводах машины. Если к двухфазному идеализированному двигателю подведено несинусоидальное симметричное напряжение, то индукция в воздушном зазоре повторит форму приложенного напряжения. В воздушном зазоре вращающееся поле будет содержать наряду с первой гармоникой еще и высшие гармоники. Таким образом, зная форму подведенного к выводу машины напряжения, можно определить гармонический состав поля в воздушном зазоре.

Если сеть автономная и мощность двигателя соизмерима с мощностью генератора, 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 — вал — механический выход машины. При нелинейном изменении момента

нагрузки M_c или частоты вращения n , в воздушном зазоре появляются высшие гармоники. Если мощность двигателя соизмерима с мощностью сети, к которой он подключен, то высшие гармоники от ударных моментов могут из зазора «выйти» на электрический вывод и исказить напряжение сети.

Со стороны механического вывода высшие гармоники в воздушном зазоре могут появиться при нелинейном изменении частоты вращения, а также при одновременном нелинейном изменении M_c и n . [2].

Высшие временные гармоники могут «прийти» в воздушный зазор и с теплового вывода. При нелинейном изменении температуры среды, окружающей электрическую машину, в воздушном зазоре появляются высшие гармоники и магнитное поле искажается. Наибольшие амплитуды высших гармоник имеют место при тепловых ударах.

Пространственные гармоники оказывают значительное влияние на процессы преобразования энергии в электрической машине. Пространственные гармоники в воздушном зазоре машины появляются из-за особенностей конструкции электрической машины. К основным пространственным гармоникам относятся гармоники МДС, зубцовые, гармоники, связанные с нелинейностью параметров ЭМ, технологические и гармоники комбинационных частот [1]. Значительное влияние на состав пространственных гармоник оказывают эксцентриситет расточки статора и ротора, конусность и эллипсность ротора, несоосность статора и ротора, дефекты обмоток статора и ротора.

Таким образом, в воздушном зазоре машины существует бесконечный спектр поля, который можно разбить на множества гармоник. Это деление можно производить по их происхождению. Сложившееся деление гармоник на временные и пространственные достаточно условно. Все гармоники связаны с энергией поля и не могут рассматриваться вне пространства и времени.

Уравнения, описывающие процессы в большинстве электрических машин, можно получить, преобразуя уравнения обобщенной ЭМ. 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.

Для диагностики асинхронных двигателей может быть использована математическая модель. Анализ магнитного поля в воздушном зазоре и исследование гармонического состава напряжений и токов асинхронного двигателя позволяет сделать заключение о его техническом состоянии.

Система диагностики технического состояния электродвигателя на основе анализа пространственных и временных гармоник магнитного поля содержит датчики для преобразования параметров пространственных и

временных гармоник в унифицированный электрический сигнал. С помощью аналого-цифровой преобразователя полученная информация вводится в вычислительное устройство для дальнейшей обработки. Для обработки информации используется либо персональный компьютер, либо специализированный контроллер с соответствующим программным обеспечением. Структурная схема системы диагностики показана на рисунке 1. Разработка программного обеспечения может вестись по двум направлениям: либо просто анализ гармонических составляющих напряжений и токов статора, либо вычисление коэффициентов математической модели. По первому направлению задача упрощается, так как необходимо только создать программу, анализирующую гармонический состав напряжений и токов. Эта программа должна запоминать состав гармоник при нормальном состоянии двигателя и при работе двигателя периодически снимать показания и сравнивать их с составом гармоник, полученных при нормальном состоянии двигателя. При возникновении отклонений программа должна выдавать сигнал либо на отключение двигателя, при большом рассогласовании, либо сигнализировать о начале возникновения повышенной вибрации.

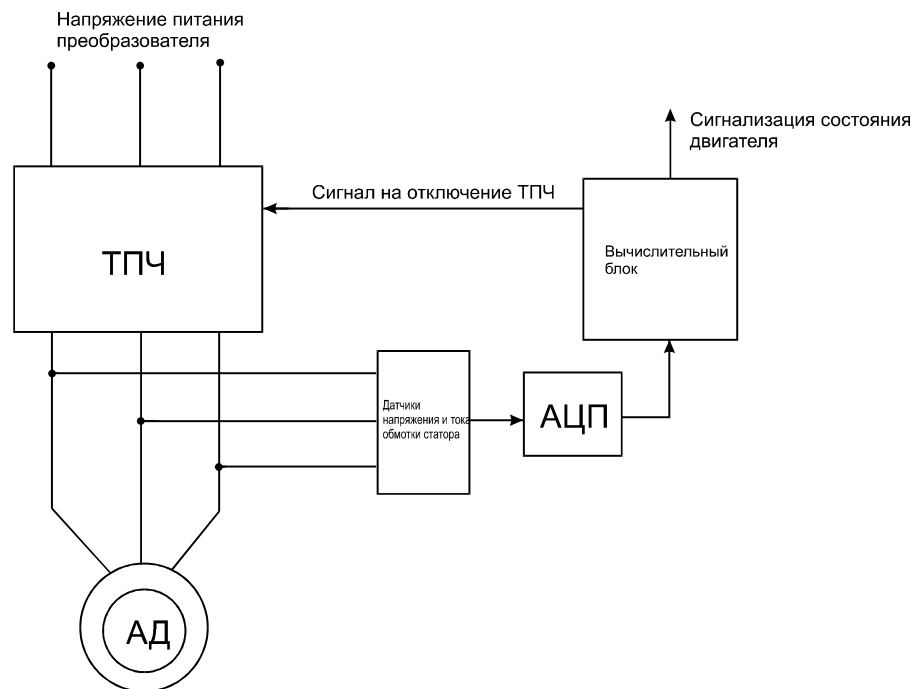


Рисунок 1 – Структурная схема системы диагностики

Реализация такой программы не вызывает затруднений, но такой подход имеет ряд недостатков. Во-первых, необходимы исследования, которые бы позволяли судить о корреляции неисправностей подшипников с параметрами определенных гармоникам, а этот процесс требует больших

затрат времени и средств. Во-вторых, данный подход не позволяет идентифицировать дефекты, рассмотренные ранее.

Для реализации второго подхода нужна более сложная программа, так как она должна рассчитывать коэффициенты математической модели в реальном масштабе времени и сравнивать эталонные значения этих коэффициентов со значениями, получаемыми в процессе работы асинхронного двигателя. Основная сложность связана с реализацией математической модели, содержащей дифференциальные уравнения для каждой гармоники, при этом получается громоздкая система уравнений. Но при таком подходе появляется возможность определять такие дефекты, как несоосность статора и ротора, осевой сдвиг ротора, эксцентриситет ротора относительно статора, эллипсность ротора, конусность статора и ротора.

Но при любом подходе необходима программа, выполняющая анализ гармонических составляющих напряжений и токов статора. Программа спектрального анализа должна выделять из сигналов, получаемых с датчиков, параметры гармонических составляющих и использовать эти данные для дальнейшего исследования математической модели.

Для составления и исследования математической модели электродвигателя в данной работе использована интегрированная система автоматизации математических расчетов MATLAB 5.2.1. [3].

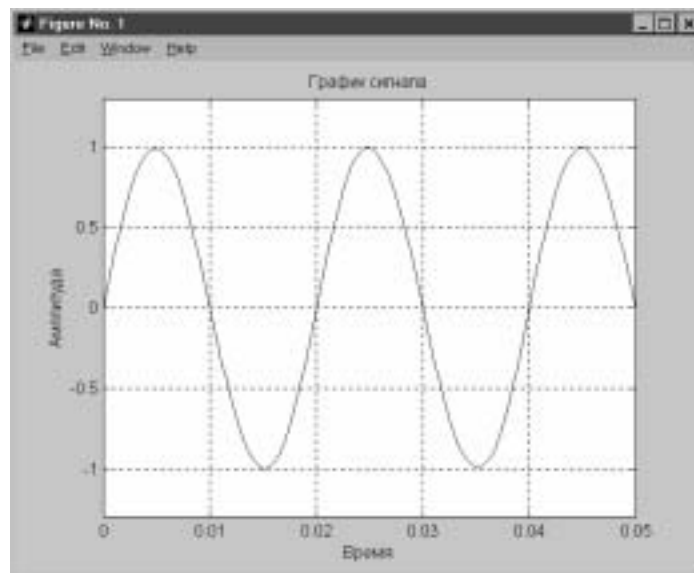


Рисунок 2 – График исследуемого сигнала

Для проведения компьютерного эксперимента средствами системы MathLab, был сформирован синусоидальный сигнал, имитирующий

сигнал, получаемый с датчика, который содержит несколько гармоник с разными амплитудами, и выполнено быстрое преобразование Фурье. Для того, что бы получить более достоверные результаты, было введено искажение исходного сигнала, содержащего спектр гармоник, путем добавления к нему шума при помощи генератора случайных чисел. Данная функция так же входит в состав системы MathLab. Этот шум моделировал наводки и помехи, существующие в реальной системе. График сигнала приведен на рисунке 2. По результатам прямого преобразования Фурье построен график спектральной плотности сигнала в полулогарифмическом масштабе (рисунок 3).

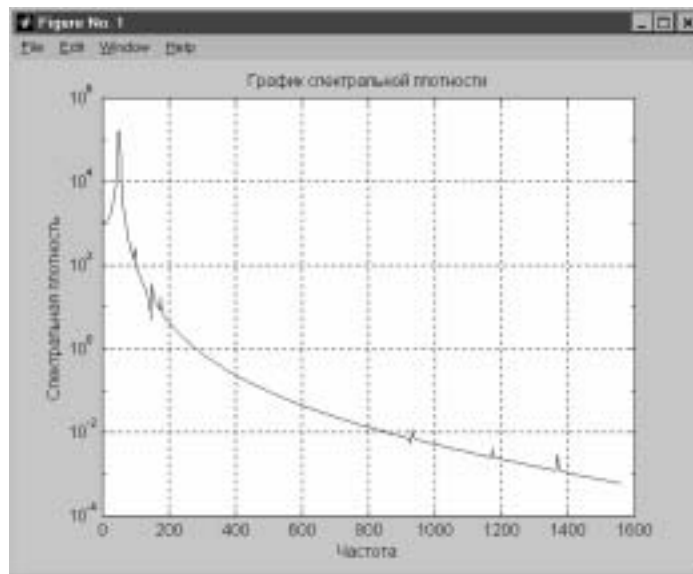


Рисунок 3 – График спектральной плотности сигнала

В процессе исследования работы программы было установлено, что она определяет гармоники, амплитуда которых составляет 0,0001 от амплитуды основной гармоники. Дальнейшее снижение значения амплитуды гармоник вызывает затруднения в их определении из-за наличия шумов, внесенных при помощи генератора случайных чисел. Из этого следует, что программа обладает чувствительностью, достаточной для практического исследования гармонического состава сигнала.

Для исследования влияния различных дефектов асинхронного двигателя на картину магнитного поля, был произведен расчет и построена топография магнитного поля. Для решения этой задачи воспользовались имеющимся в составе системы MathLab 5.2.1 методом конечных элементов. Расчет магнитного поля осуществлялся в следующем порядке: составление топологии исследуемой магнитной цепи; обработка границ и задание граничных условий; задание коэффициентов

дифференциальных уравнений; разбиение на конечные элементы; решение уравнений и визуализация решения.

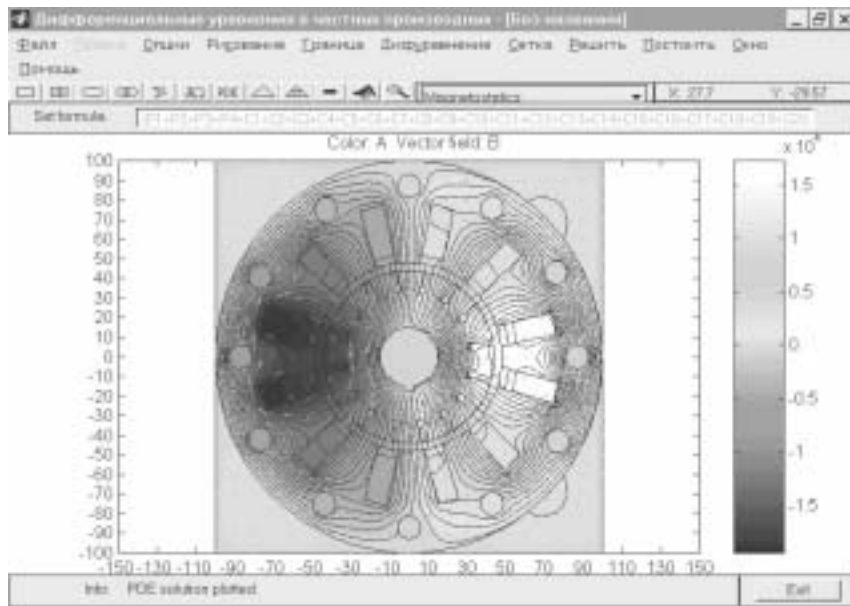


Рисунок 4 – Картина магнитного поля исправного электродвигателя

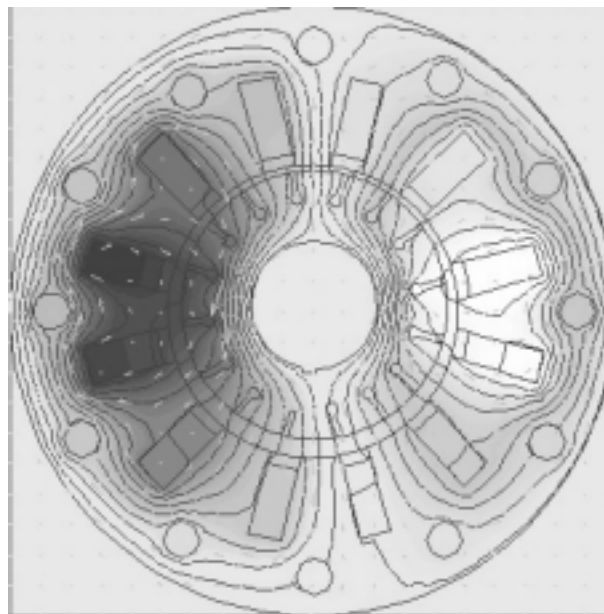


Рисунок 5 – Искажение картины поля при радиальном сдвиге ротора

Для исследования влияния характерных дефектов асинхронного двигателя на топографию поля, были построены модели, которые имитировали смещение ротора в результате неисправности подшипников, обрыв стержня обмотки ротора, замыкание витков в пазу статора и др. В

результате получены картины, на которых видно искажение магнитного поля дефектами.

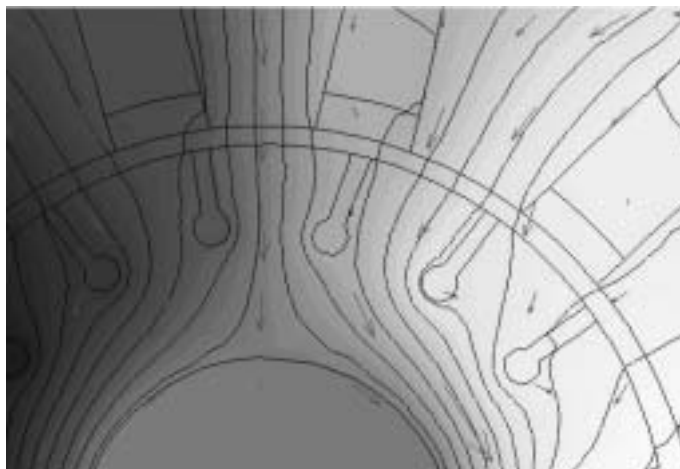


Рисунок 6 – Обрыв стержня обмотки ротора

Дефекты насосно-компрессорного агрегата и электродвигателя приводят к повышению уровня вибрации ротора, а это в свою очередь приводит к искажению магнитного поля и мгновенных значений токов и напряжений. Анализ пространственных гармоник магнитного поля двигателя и временных гармоник токов и напряжений обмоток статора позволяет выявить и идентифицировать дефекты как самого двигателя, так и всего агрегата, оценить техническое состояние и прогнозировать остаточный ресурс эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.- 256 с.
- 2 Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1994. – 456 с.
- 3 Гультяев А.К. MATLAB 5.2 Имитационное моделирование в среде Windows. – СПб.: Корона принт, 1999. – 287 с.