

ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

С.О. Хомутов, В.Г. Тонких

Определение перспективных направлений исследований – одна из важнейших задач системного анализа, для решения которой необходимо составить подробную и объемлющую структуру исследуемой системы организационно-технических мероприятий обеспечения эксплуатационной надежности электродвигателей.

Выполненный авторами в 2003–2004 гг. анализ состояния парка электродвигателей на сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края показал отсутствие практически на всех предприятиях действующей системы планово-предупредительного ремонта, а также системного подхода к учету аварий двигателей и проведению их профилактических осмотров. Наряду с этим были отмечены низкий уровень компьютеризации и применение новейших информационных технологий в производственном процессе, несмотря на то, что их использование, например в области диагностики состояния электродвигателей, неизменно ведет к сокращению затрат на содержание парка электродвигателей.

Кроме того, результаты исследований ряда авторов, приведенные в [2], свидетельствуют о том, что ремонты в рамках системы планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электродвигателей в сельском хозяйстве в установленные сроки часто не проводятся. К тому же предусмотренные данной системой работы выполняются не всегда на должном уровне. Связано это, помимо прочего, с тем, что квалификация обслуживающего персонала на сельскохозяйственных предприятиях не всегда соответствует предъявляемым требованиям. Некоторая часть электриков, занятых на обслуживании электрооборудования, не имеют специального образования, а обеспеченность электромонтерами, как правило, составляет лишь 50%. Все это говорит о необходимости формирования стройной системы, которая бы охватывала все стадии жизненного цикла двигателя, а также разработки специального комплекса мер, позволяющего проводить необходимые работы с минимальным участием обслуживающего персонала. От того, насколько правильно и эффективно будет решена данная задача, во многом зависит увеличение срока службы электродвигателей.

Как известно, работа технологического оборудования в неблагоприятных условиях эксплуатации отрицательно сказывается на работоспособ-

ности электрических двигателей, и только своевременная и достоверная информация об их техническом состоянии позволяет правильно оценить остаточный ресурс, т.е. принять решение о целесообразности дальнейшего использования.

Указанная своевременность получения информации может быть обеспечена путем ранней диагностики электродвигателя и прогнозирования его состояния на перспективу, а достоверность – использованием современных технических средств измерения и контроля.

Несмотря на это, заводы-изготовители электрооборудования и отраслевые организации, объединяющие потребителей – владельцев электродвигателей, долгое время не ставили перед собой задачу оптимизации затрат на их ремонт, а потому при проектировании и последующей эксплуатации последние не оснащались специальными средствами контроля, не обращалось внимания на ремонтно- и контролепригодность двигателей. Кроме того, мало совершенствовались методы диагностики и контроля, применяемые в процессе эксплуатации и ремонта.

Более того, принятая на большинстве предприятий агропромышленного комплекса России система планово-предупредительного ремонта характеризуется отсутствием должного внимания к реальному техническому состоянию двигателя, которое в процессе эксплуатации существенно меняется [6]. Так, при достижении электродвигателем наработки, соответствующей времени выполнения технического обслуживания, состояние изоляции обмотки может либо не требовать проведения технического обслуживания, либо ремонта. Тогда, в первом случае, выполнение обслуживания будет сопровождаться затратами, которых можно было бы избежать, а во втором возможен при невыполнении ремонта преждевременный выход электродвигателя из строя с нанесением, как уже было сказано, существенного ущерба.

В рассмотренных случаях своевременный диагностический контроль состояния изоляции позволит избежать указанных трудностей и вовремя провести соответствующие мероприятия, исключив тем самым возможность дальнейшего развития возникших в изоляции дефектов.

Таким образом, в рамках исследуемой системы организационно-технических мероприятий обеспечения эксплуатационной надежности электродвигателей на протяжении всего их жизненно-

го цикла требуется вести диагностику и контроль изоляции, позволяющие установить реальное состояние электродвигателя, и прогнозирование дополнительной наработки до очередного диагностического контроля. Данный цикл повторяется до тех пор, пока по результатам диагностики не потребуется проведения мероприятий по восстановлению изоляции обмоток.

Следует отметить, что в рамках организационно-технического обеспечения ремонта после проведения технологических операций по восстановлению электрической изоляции необходим диагностический контроль и прогнозирование изменения состояния изоляции статорных обмоток с целью назначения новой наработки до следующей диагностики.

Для оценки технического состояния электродвигателей можно выделить три группы видов контроля и предъявляемые к ним требования [1]:

- эксплуатационный штатный контроль, характеризующийся оптимальным насыщением средствами диагностического контроля и обеспечивающий повышение эффективности мероприятий по восстановлению работоспособности двигателей за счет использования информационно-программного обеспечения [4];

- эксплуатационный периодический контроль, совершенствующийся на базе новых методов контроля и обеспечивающий рост экономической эффективности предприятий за счет создания диагностических региональных центров при участии заводов-изготовителей;

- операционный ремонтный контроль, выполняемый при минимальном демонтаже электродвигателей и позволяющий получить при этом более полный и достоверный объем информации о техническом состоянии электродвигателя по сравнению с традиционными методами.

Для соблюдения данных требований были решены следующие задачи [1–3, 5].

1. Исследованы существующие на сегодняшний день способы оценки состояния электродвигателей.

В настоящее время различают тестовое и функциональное диагностирование. В первом случае при оценке состояния на объект подаются тестовые воздействия, а сам он находится, как правило, в нерабочем состоянии. Во втором случае, т.е. при функциональном диагностировании, объект всегда находится в рабочем состоянии, а поиск дефектов осуществляется на основе измерений и анализа диагностических параметров, который включает в себя математическую обработку исходной информации (вычисление спектральных характеристик и корреляционных функций, цифровую фильтрацию, статистику и т.д.).

На производстве для обеспечения непрерывного технологического процесса предпочтительнее использовать функциональное диагностирование. Современные системы мониторинга и диагностики электрических машин строятся именно на этом принципе на базе неразрушающих методов контроля и диагностирования.

Создание системы обеспечения эксплуатационной надежности электродвигателей, широко используемых на предприятиях промышленности и агропромышленного комплекса, представляет собой многогранную задачу, которая может быть решена только при реализации комплексного подхода, включающего в себя, наряду с другими эксплуатационными мероприятиями, применение средств диагностики и контроля двигателей, внедрение современных защитных устройств и математическое прогнозирование технического состояния на основе адекватной модели, учитывающей изменение основных характеристик оборудования под воздействием эксплуатационных факторов.

Анализ публикаций, посвященных надежности работы электрических машин, позволил сделать вывод о том, что большинством исследователей основное внимание уделяется проблемам диагностики, а вопросы ремонта и обслуживания не поднимаются. Причем решение проблем диагностики идет по следующим направлениям:

- построение математических моделей надежности электродвигателей, учитывающих действие различных факторов;

- применение новых приборов и материалов;

- использование диагностики в режиме реального времени (функциональное диагностирование).

Сущность первого направления заключается в том, что, задавая неисправности искусственно, путем их физического моделирования, контролируются и анализируются изменения свойств динамических проявлений электромагнитных процессов в машине.

Второе направление предусматривает применение новых материалов с улучшенными характеристиками, внедрение новых способов и приборов, позволяющих производить осмотр электродвигателей и выявлять какие-либо дефекты.

Наиболее перспективно и предпочтительно функциональное диагностирование в режиме реального времени. Оно позволяет контролировать параметры электродвигателя без вывода его из работы, что способствует экономии средств и снижению трудоемкости обслуживания. Существует возможность использования этого метода для контроля как в нормальных, так и в аварийных режимах работы.

Диагностика в режиме реального времени осуществляется несколькими методами:

ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

- вибродиагностика;
- спектральный анализ магнитного поля в зазоре электрической машины;
- диагностика с помощью нейро-нечетких сетей.

Так, проведенные рядом авторов исследования по изучению влияния различных видов дефектов на функционирование электрических машин показали, что комплексной диагностической информацией обладает сигнал вибрации, а многие другие виды сигналов практически дублируют ту или иную информацию, содержащуюся в сигнале вибрации. Диагностирование этим методом можно проводить на месте, без разборки и остановки оборудования.

Кроме этого, в реальных машинах в воздушном зазоре наряду с основной гармоникой имеется бесконечное число гармоник поля.

В установленном режиме основной источник высших временных гармоник – несинусоидальное напряжение на выводах машины. Второй источник временных гармоник в воздушном зазоре – вал – механический выход машины. Высшие гармоники могут появиться в воздушном зазоре и с теплового вывода. Наибольшие амплитуды высших гармоник имеют место при тепловых ударах. 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.

Анализ магнитного поля в воздушном зазоре и исследование гармонического состава напряжений и токов электрического двигателя позволяет сделать заключение о его техническом состоянии.

Рассмотренные методы позволяют получить большое количество информации о контролируемом объекте, но оба имеют недостатки. Их наличие может привести к невозможности обнаружения дефекта, который повлечет за собой аварию электрической машины.

Для компенсации недостатков различных методов анализа технического состояния двигателя необходимо использование системы комплексного мониторинга, математический аппарат которой совмещает несколько взаимодополняющих методов.

Такой комплексный подход реализован в новом поколении систем мониторинга и диагностики электрических машин. Эти системы представляют собой переносной диагностирующий модуль и программное обеспечение для обнаружения, идентификации и прогноза развития дефектов в каждом контролируемом узле машины. Программное обеспечение предназначено заменить экспертов высокой квалификации, которые обслуживают практически все системы мониторинга. От наиболее

близких по постановке задачи аналогов его отличает четыре основных свойства, а именно:

- обнаружение и идентификация всех дефектов на ранней стадии их развития;
- высокая (выше 90%) достоверность диагноза и прогноза;
- полная автоматизация процесса постановки диагноза и прогноза;
- отсутствие необходимости проведения длительных работ по предварительному обучению системы.

К основным свойствам наиболее известной переносной системы мониторинга и диагностики электродвигателей по их вибрации относятся:

- полнота решений задач мониторинга и диагностики по вибрации без встраивания датчиков в двигатель и без измерения других видов сигналов;
- обнаружение и идентификация основных потенциально опасных дефектов на ранней стадии их развития, за исключением старения изоляции обмоток данных электрических машин;
- минимальное суммарное время на мониторинг и диагностику, включая операции измерения, анализа и постановки диагноза;
- автоматическое выполнение операций мониторинга и постановки диагноза и прогноза;
- возможность разделения как операций, так и результатов мониторинга и диагностики;
- модульное построение, позволяющее при необходимости наращивать систему;
- возможность использования переносной системы в режиме стационарной.

Существующие стационарные системы вибрационного мониторинга не рассчитаны на глубокую диагностику и долгосрочный прогноз состояния вращающегося оборудования. Эти задачи в настоящее время решаются переносными системами вибрационной диагностики.

Более того, одно из направлений внедрения глубокой диагностики в новых поколениях вращающегося оборудования – объединение средств контроля, управления и диагностики в единую систему при условии повышения контролепригодности объектов диагностики.

Функциональная диагностика и контроль технологических процессов включают в себя измерение широкого спектра самых разных физических величин (вибраций, токов и напряжений, электромагнитных полей, акустических волн, температуры и т.д.). Часто все эти величины требуется измерять одновременно, что можно осуществить с помощью многоканальных и многофункциональных измерительных приборов, управляемых компьютером или микроконтроллером. Упростить конструкцию таких приборов и снизить тем самым их стоимость позволяет использование однотипных

датчиков, способных преобразовывать в электрический сигнал большинство из перечисленных выше величин. С помощью данных электромагнитных датчиков можно измерять практически любые механические и большинство электромагнитных величин. Однако при всех своих достоинствах датчики этого типа обладают одним серьезным недостатком, а именно, их быстродействие для решения многих задач недостаточно велико. В рамках известных в настоящее время способов преобразования параметров электромагнитных датчиков существенно увеличить быстродействие по ряду причин не представляется возможным. Требуется новые способы, в которых повышение быстродействия не приводит к ухудшению других технических характеристик, в первую очередь чувствительности и точности.

2. Обоснована необходимость разработки эффективного метода диагностики изоляции электродвигателей на основе использования изменения характера волновых процессов в обмотке.

3. Исследованы волновые затухающие колебания, возникающие при подаче на обмотку электродвигателя прямоугольного импульса напряжения.

4. Построена и исследована математическая модель волновых затухающих колебаний с помощью параметров схемы замещения – C_{σ} , r_{σ} , C_{κ} , R_{κ} , характеризующих изоляцию обмотки двигателя, где C_{σ} – межвитковая емкость; r_{σ} – межвитковое сопротивление; C_{κ} – емкость корпусной изоляции; R_{κ} – сопротивление корпусной изоляции.

5. Обоснован обобщенный диагностический параметр ψ , обеспечивающий адекватную оценку состояния изоляции электродвигателя:

$$\psi = (A1.1/A1.2) \cdot T, \quad (1)$$

где к диагностическим параметрам, изображенным на рисунке 1, относятся:

A1.1 – амплитуда первого полупериода, В;
A1.2 – амплитуда второго полупериода, В;
T – период колебаний, мкс.

6. Разработан метод диагностики изоляции, основанный на использовании зависимости изменения параметров (A1.1, A1.2 и T) волновых затухающих колебаний в обмотке от состояния и степени старения изоляции.

Данные диагностические параметры можно использовать как для текущей оценки технического состояния изоляции обмотки, так и для прогнозирования ее дальнейшего состояния. Вместе с тем одновременное использование трех диагностических параметров усложняет расчеты при прогнозировании, а в ряде случаев и процедуру оценки состояния изоляции. Поэтому для диагностирования изоляции обмоток электродвигателя на всех этапах ее жизненного цикла целесообразно использовать обобщенный диагностический параметр (1).

Процесс нормального старения электрической изоляции характеризуется плавным уменьшением значения указанного диагностического параметра на протяжении всего периода эксплуатации двигателя. Резкое, скачкообразное уменьшение ψ , как правило, свидетельствует либо об увлажнении обмотки, либо о возникновении в ней дефектов.

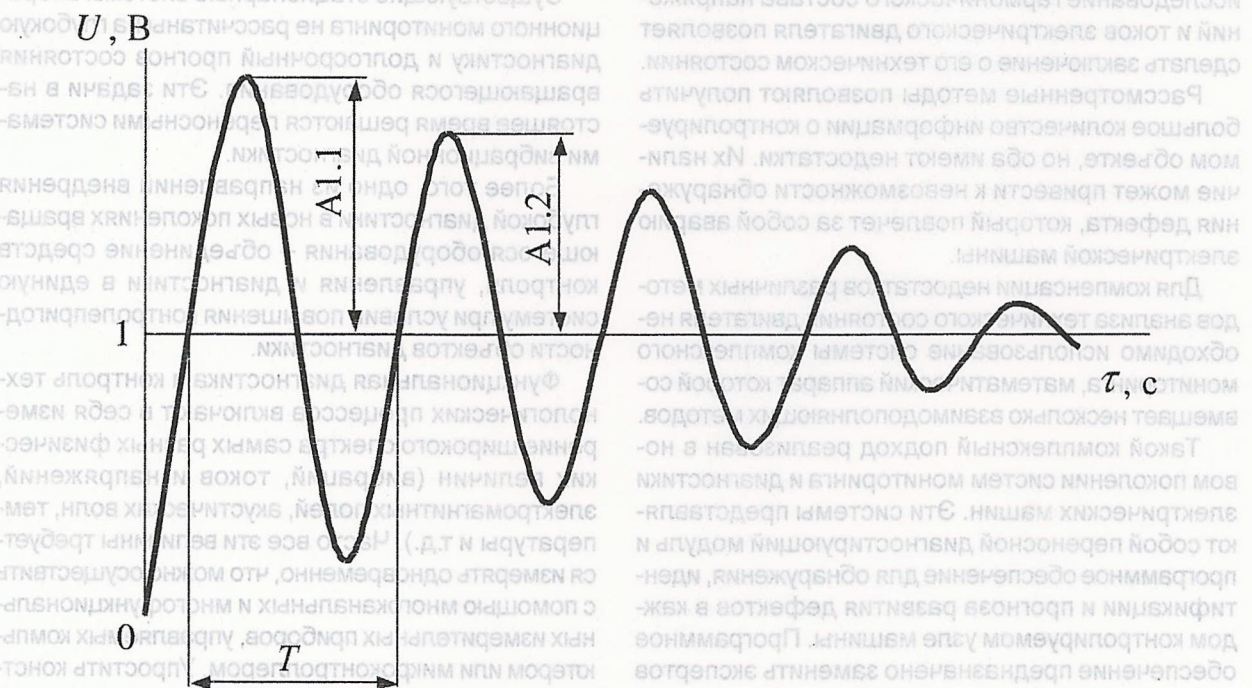
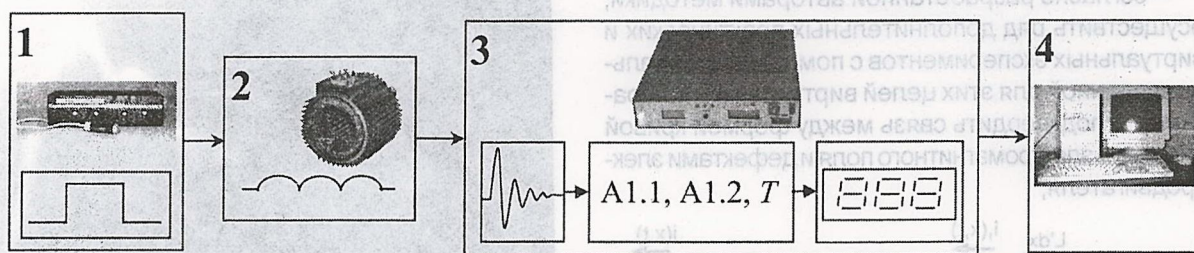


Рис. 1. Затухающий колебательный процесс в обмотке электродвигателя

ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ



- 1 – универсальный генератор импульсов «Омега ГС-1»;
2 – обмотка статора электродвигателя;
3 – прибор «Омега ВП-02»;
4 – персональный компьютер.

Рис. 2. Функциональная схема информационно-программного комплекса средств измерения и прогноза

7. Обоснована необходимость разработки и созданы современные технические средства диагностики изоляции обмоток электродвигателя: цифровой измеритель затухающих колебаний ЦИЗ-1, устройство контроля состояния изоляции УКСИ-1, прибор диагностики корпусной и витковой изоляции ДКВИ-2, диагностические приборы «Омега ЗК-01», «Омега ВП-02», «Омега ВП-03».

8. Обобщены результаты научных исследований в области диагностирования и прогнозирования технического состояния электрической изоляции и разработан информационно-программный комплекс средств измерения и прогноза, ставший элементом системы поддержания эксплуатационной надежности электродвигателей.

Оценка состояния изоляции конкретного электродвигателя с использованием метода, основанного на измерении параметров волновых затухающих колебаний, при помощи технических средств указанного информационно-программного комплекса осуществляется следующим образом.

В ходе измерения параметров волновых затухающих колебаний в обмотке двигателя полученные значения диагностических параметров $A1.1$, $A1.2$, и T переносятся из прибора, как это показано на рисунке 2, в персональный компьютер, обрабатываются с помощью специального программного обеспечения, сравниваются с эталонными значениями, полученными в результате расчета по известным данным о двигателе, его типе, мощности и частоте вращения, в результате чего выдается полная информация не только о состоянии изоляции обмотки электродвигателя, но и другая важная информация.

9. Обоснована информативность внешнего электромагнитного поля электрического двигателя с целью разработки метода диагностики рассматриваемых электрических машин.

В настоящее время на кафедре электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета

им. И.И. Ползунова разрабатываются сразу несколько нигде ранее не применявшихся методов диагностики состояния изоляции, как наиболее слабого и уязвимого элемента электродвигателя. На основе данных методов уже спроектированы либо находятся на данной стадии различные диагностические приборы. Но, несмотря на это, поиск альтернативных информационных каналов в области диагностики остается важнейшей задачей. Одним из таких каналов является внешнее электромагнитное поле электрической машины.

Для доказательства информативности данного канала авторами были проведены практические эксперименты, в которых наблюдались несколько двигателей с различным уровнем дефектности. Для исследования внешнего электромагнитного поля электродвигателей был разработан электромагнитный датчик. Полученные осциллограммы приведены на рисунках 4–6.

В ходе экспериментов авторами было установлено, что внешнее электромагнитное поле двигателя может быть использовано для диагностики его состояния. Как показано на рисунке 6, зависимость формы кривой внешнего электромагнитного поля от расстояния до электромагнитного датчика заключается только в уменьшении амплитуды. Данный факт доказывает то, что информация, полученная датчиком, исходит действительно от испытуемого объекта. Следует также заметить, что внешнее электромагнитное поле у двигателей с различным уровнем дефектности обладает определенными особенностями.

Для теоретического обоснования экспериментально полученных авторами зависимостей была разработана схема замещения электродвигателя, представленная на рисунке 3. Данная схема позволяет исследовать процессы, происходящие не только в идеальном двигателе, но и в двигателе с определенным уровнем дефектности.

В целях создания на базе проведенных исследований нового метода диагностики состояния электродвигателей необходимо:

– согласно разработанной авторами методики, осуществить ряд дополнительных практических и виртуальных экспериментов с помощью специально созданной для этих целей виртуальной лаборатории и подтвердить связь между формой кривой внешнего электромагнитного поля и дефектами электродвигателя;

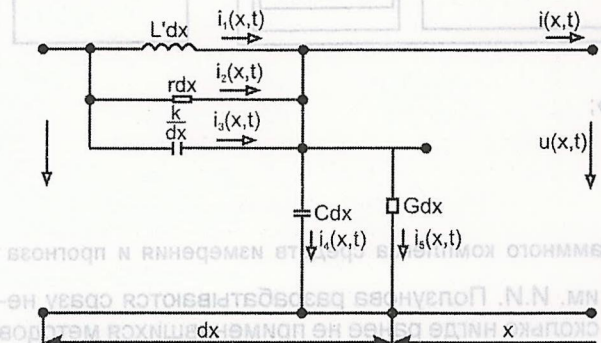


Рис. 3. Схема замещения электродвигателя

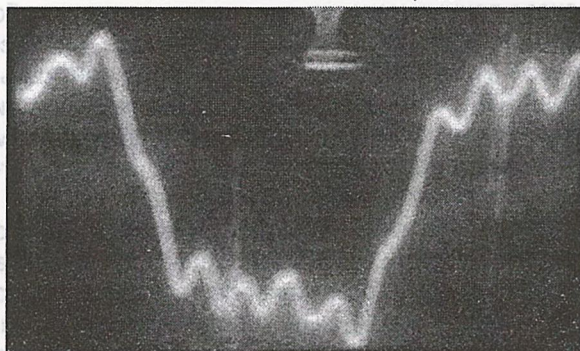


Рис. 4. Внешнее электромагнитное поле двигателя с высоким уровнем дефектности

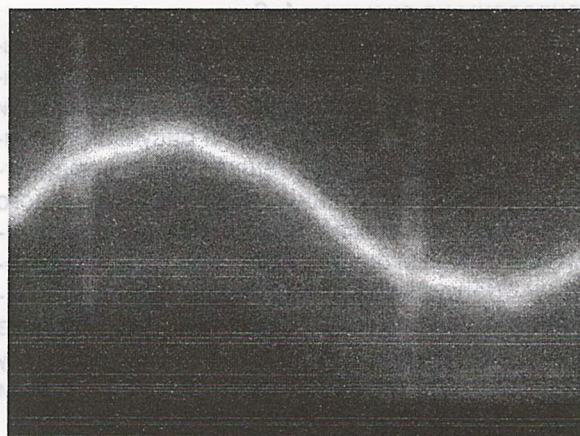
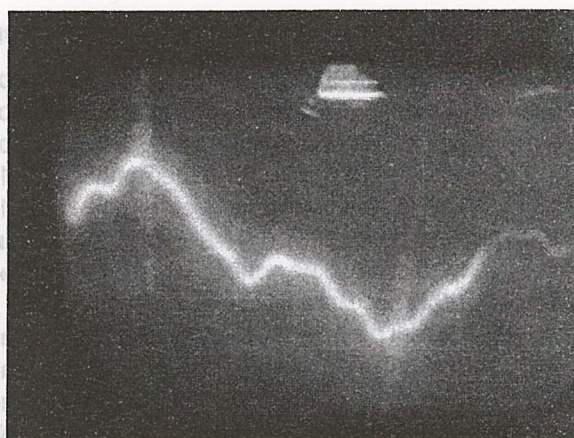


Рис. 5. Внешнее электромагнитное поле двигателя с низким уровнем дефектности

– посредством Фурье-преобразования отыскать аналитическую зависимость между формой кривой и дефектами и, как следствие, осуществить определение конкретных дефектов электродвигателя по кривой БЭМП.



а)



б)



в)

- а) датчик расположен вплотную;
- б) датчик на расстоянии 5 см;
- в) датчик удален на расстояние 10 см.

Рис. 6. Зависимость формы кривой внешнего электромагнитного поля двигателя от расстояния до испытуемого объекта

Таким образом, приведенный в настоящей статье анализ состояния проблемы низкой эксплуатационной надежности электродвигателей в сельском хозяйстве позволил предложить пути дальнейшего развития системы организационно-технических мероприятий обеспечения эксплуатационной надежности электродвигателя, обеспе-

ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

чивающей достижение поставленных целей путем комплексного решения задач защиты, диагностики, прогнозирования технического состояния изоляции на протяжении всего его жизненного цикла [2, 7].

Литература

1. Хомутов С.О. Повышение эксплуатационной надежности электродвигателей путем проведения предремонтной диагностики изоляции обмоток статора / С.О. Хомутов, В.И. Сташко, О.И. Хомутов // Методы и средства измерений физических величин: Тез. докл. третьей Всерос. науч.-техн. конф.: В 10-ти ч. / Под общ. ред. С.М. Никулина. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. техн. ун-та, 1998. Ч. 3. С. 39.

2. Исследование надежности электрооборудования и разработка энергосберегающих, экологически чистых технологий его восстановления: Отчет о НИР (заключит.) / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова; Рук. О.И. Хомутов. №ГР 01970000744; Инв. №02990001280. Барнаул, 1999. – 221 с.

3. Сташко В.И. Диагностика изоляции электродвигателей в сельском хозяйстве на основе использо-

вания метода волновых затухающих колебаний в обмотке: Дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 1998. 134 с.

4. Хомутов С.О. Организация системы информационно-программного обеспечения комплекса мероприятий по восстановлению работоспособности электродвигателей на стадии технического обслуживания и ремонта / С.О. Хомутов, И.А. Гутов, О.И. Хомутов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Мат. II всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чувашского гос. ун-та, 1998. С. 34–36.

5. Хомутов О.И. Эксплуатация, диагностика и ремонт изоляции электрических машин: Учеб. пособие для студентов вузов / О.И. Хомутов, В.И. Сташко, С.О. Хомутов. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. 146 с.

6. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий / Госагропром СССР. М.: ВО Агропромиздат, 1987. С. 191.

Хомутов О.И. Информационное обеспечение системы эксплуатационной надежности электрооборудования / О.И. Хомутов, И.А. Гутов, С.О. Хомутов // Наука, практика, образование: Труды Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1997. Вып. 7. С. 145–148.