

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В.В. Бобров, С.О. Хомутов

Данная работа посвящена разработке метода контроля состояния асинхронных электродвигателей. В основе метода лежит анализ спектра внешнего магнитного поля электрического двигателя. Данный метод особенно актуален для предприятий агропромышленного комплекса в связи с простотой, низкой себестоимостью и удобством диагностики.

Ключевые слова: электродвигатель, надежность, диагностика, прогнозирование, изоляция, магнитное поле, остаточный ресурс.

Как известно, долговременная и надежная работа электрооборудования на производстве в большинстве случаев определяет эффективность всех производственных циклов. При этом электродвигатель является наиболее распространенным силовым элементом сельскохозяйственных и промышленных приводов.

В настоящее время асинхронные и синхронные электроприводы составляют около 70 % общего количества электроприводов и потребляют более половины всей вырабатываемой в нашей стране электроэнергии. По существующим прогнозам асинхронные и синхронные электродвигатели еще несколько десятилетий останутся основными преобразователями электрической энергии в механическую [1].

На сегодняшний день в сельском хозяйстве получили наибольшее распространение низковольтные (на напряжение 380 В) асинхронные двигатели (АД) общего назначения мощностью от 0,5 до 75 кВт. Они способны автоматически изменять момент вращения в соответствии с изменением момента сопротивления на валу, относительно просты в конструкции и имеют низкую стоимость по сравнению с другими видами электродвигателей. Однако тяжелые условия и специфика эксплуатации электродвигателей в сельском хозяйстве неизбежно ведут к снижению их надежности и долговечности, и даже во время эксплуатационной паузы наблюдается интенсивное негативное воздействие на электроизоляционную систему.

Как уже упоминалось, от надежности асинхронных двигателей зависит реализуемость технологического процесса. Это обусловлено тем, что выход из строя АД приводит к тяжелым авариям и большому матери-

альному ущербу предприятию, связанному с простоем технологических процессов, устранением последствий аварий и ремонтом вышедшего из строя электродвигателя.

Эксплуатация находящихся в неудовлетворительном техническом состоянии электродвигателей приводит:

- к прямым финансовым потерям, связанным с непрогнозируемым выходом из строя оборудования и вызванным этим нарушением технологического процесса;
- к значительным (до 3-5 %) косвенным непродуктивным затратам электроэнергии, обусловленным повышенным электропотреблением (при той же полезной мощности) [2].

Эксплуатационная надежность любых электродвигателей в значительной степени зависит от качества электрической изоляции. Изоляцию обмотки статора АД можно разделить на три составляющие: изоляцию обмотки относительно корпуса, отделяющую токоведущие части обмотки от железа статора; междугазную изоляцию, отделяющую фазные обмотки друг от друга; междувитковую изоляцию, отделяющую витки обмотки друг от друга. Электрическая прочность междувитковой и междугазной изоляции значительно ниже, чем корпусной, что связано с использованием разных по свойствам и назначению электроизоляционных материалов, а также конструкцией обмоток низковольтных АД. Поэтому до 90 % от общего числа отказов электродвигателей происходит из-за межвитковых замыканий в обмотке статора, а в общем случае из-за повреждения изоляции прекращают свою работу около 85 % электродвигателей [3]. При этом широко известно, что определить состояние междувитковой изоляции без использования разрушающих методов диагностики намного сложнее, чем, к

примеру, междуфазной или корпусной, что, естественно, требует специальной подготовки и навыков.

Вместе с тем, многие предприятия агропромышленного комплекса (АПК) России испытывают острый недостаток (а иногда и полное отсутствие) технических средств диагностики и контроля. Нет также и специалистов, способных профессионально обслуживать электрооборудование. Особенно остро с этой проблемой сталкивается множество небольших крестьянских и фермерских хозяйств, потери и недовыпуск продукции в которых из-за остановки оборудования может привести к полному разорению хозяйства.

В связи с этим целесообразна разработка новых методов диагностики, либо применение эффективных методов, ранее не использовавшихся в диагностике электродвигателей. К одному из таких методов относится метод вихретокового контроля.

Вихретоковые методы основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля объекта с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Плотность вихревых токов в объекте зависит от геометрических и электромагнитных параметров объекта, а также от взаимного расположения измерительного вихревого преобразователя (ВТП) и объекта. В качестве преобразователя обычно используют индуктивные катушки (одну или несколько). Синусоидальный (или импульсный) ток, действующий в катушках ВТП, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС или изменяя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на зажимах катушки или их сопротивление, получают информацию о свойствах объекта и о положении преобразователя относительно него.

Особенность вихретокового контроля заключается в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта. Их взаимодействие происходит обычно на расстояниях, достаточных для свободного движения преобразователя относительно объекта (от долей миллиметра до нескольких миллиметров). Поэтому с помощью этих методов можно получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов.

Получение первичной информации в виде электрических сигналов, бесконтактность и высокая производительность определяют широкие возможности автоматизации вихретокового контроля.

Одно из преимуществ вихретокового контроля состоит в том, что на сигналы преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами.

До сих пор вихретоковые методы использовались преимущественно для контроля качества электропроводящих объектов: металлов, сплавов, графита, полупроводников, а также для дефектоскопии, определения размеров и структуроскопии материалов и изделий [4].

При использовании метода вихретокового контроля в диагностике электродвигателей, возбуждающей катушкой являются обмотки двигателя (рисунок 1).

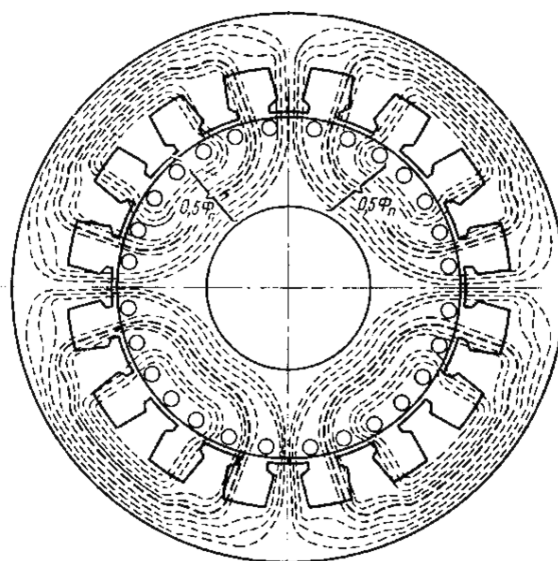


Рисунок 1 – Линии напряженности магнитного поля внутри асинхронного двигателя

В реальных машинах в воздушном зазоре наряду с основной гармоникой имеется бесконечное число гармоник поля. Зная форму подведенного к выводу машины напряжения, можно определить гармонический состав поля в воздушном зазоре. В ходе подробного изучения поля в зазоре была выведена следующая зависимость для эквивалентного поля в точке внутри АД, равноудаленной от полюсов обмотки статора, от параметров рассматриваемой электрической машины.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

$$H_v(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}\pi\delta} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_v}{2} \times$$

$$\times \left\{ I_1 \frac{\sin N_1 v \frac{\alpha_1}{2}}{\sin v \frac{\alpha_1}{2}} \left[\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} v \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} v \right) \right] + \right.$$

$$+ I_2 \frac{\sin N_2 v \frac{\alpha_1}{2}}{\sin v \frac{\alpha_1}{2}} \left[\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} (v+1) \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} (v+1) \right) \right] +$$

$$\left. + I_3 \frac{\sin N_3 v \frac{\alpha_1}{2}}{\sin v \frac{\alpha_1}{2}} \left[\sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} (v+1) \right) + \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} (v+1) \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где v – номер гармоники (от 1 до 5); δ – длина воздушного зазора; α_v – угол между 2-мя сторонами одного и того же витка (шаг обмотки); α_1 – угол между группами витков.

Для облегчения анализа параметров напряженности магнитного поля в воздушном зазоре электрического двигателя в качестве диагностического параметра были выбраны коэффициенты гармоник

$$K_i = \frac{H_i}{H_1},$$

где i – номер рассматриваемой гармоники поля [5].

Кроме того, в ходе проведенного исследования было установлено, что при комплексном подходе к разработке метода диагностики необходимо учитывать все факторы, влияющие на внешнее магнитное поле (ВМП) электродвигателя. Этими факторами являются:

- механические неисправности электрического двигателя;
- электрические неисправности двигателя;
- отклонение параметров напряжения от показателей качества электроэнергии (отклонение напряжения, несимметрия напряжений, несинусоидальность формы кривой напряжения, отклонение частоты, провалы напряжения).

При механических повреждениях электродвигателя (неравномерность воздушного зазора при неисправностях подшипникового узла или искривлении вала) наблюдается возникновение четных гармоник в спектре внешнего магнитного поля АД, что видно на рисунках 2 и 3.

В свою очередь, при электрических неисправностях двигателя происходит рост нечетных гармоник асинхронного электродвигателя относительно 1-й. Это хорошо заметно на рисунках 4 и 5.

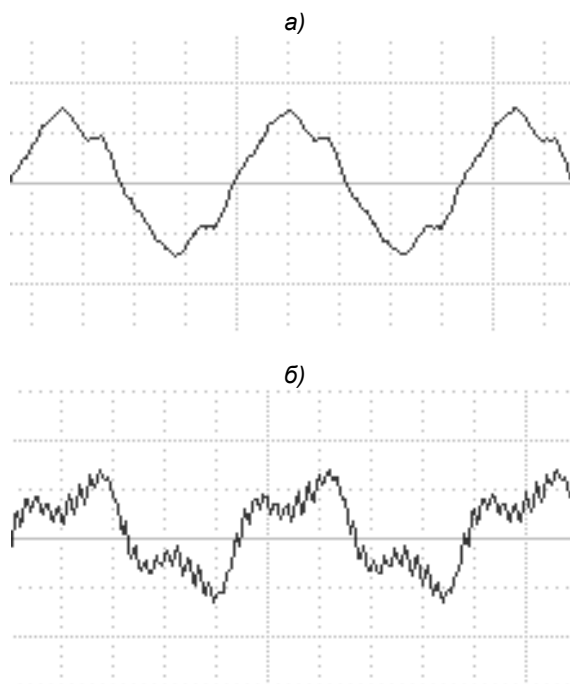


Рисунок 2 – Осциллограмма ВМП АД при механических неисправностях:
а – неисправность отсутствует;
б – эксцентриситет вала ротора

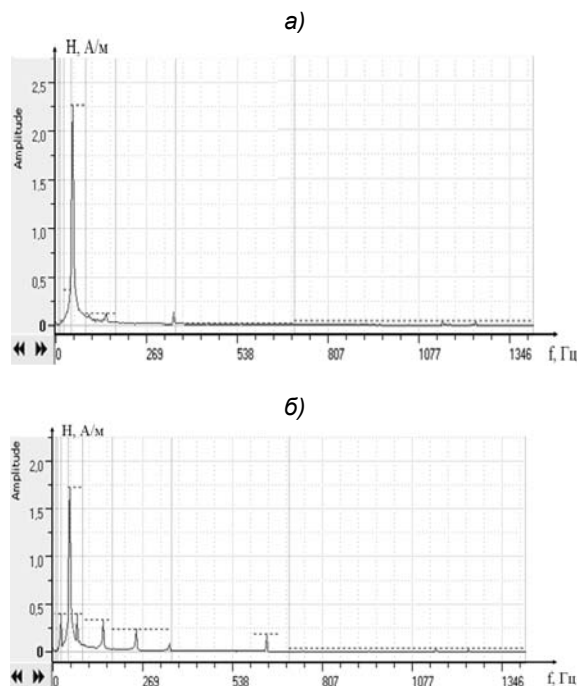


Рисунок 3 – Спектральный состав ВМП АД при механических неисправностях:
а – неисправность отсутствует;
б – эксцентриситет вала ротора

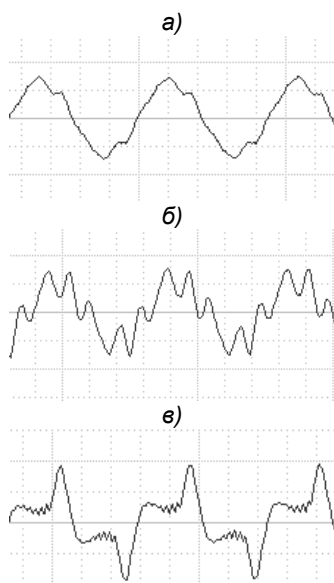


Рисунок 4 – Осциллограмма ВМП АД при электрических неисправностях:
а – неисправность отсутствует;
б – межвитковое замыкание;
в – междуфазное замыкание

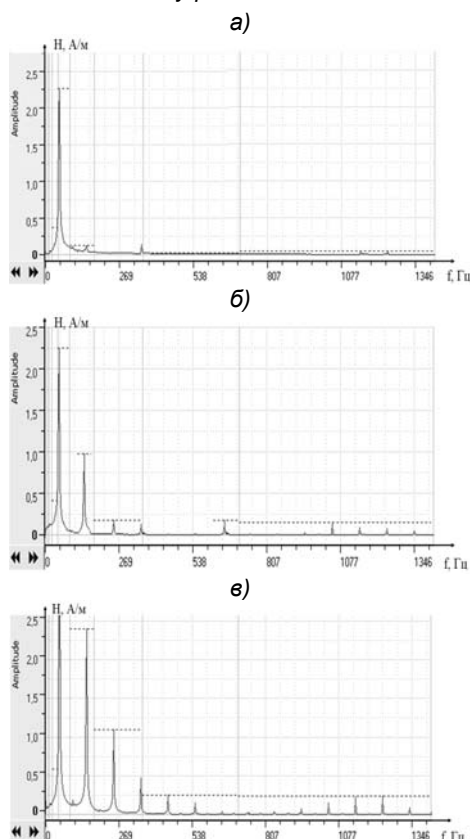


Рисунок 5 – Спектральный состав ВМП АД при электрических неисправностях:
а – неисправность отсутствует;
б – межвитковое замыкание;
в – междуфазное замыкание

При отклонении параметров напряжения от показателей качества электроэнергии, как можно увидеть на рисунках 6 и 7, наблюдается лишь рост амплитуды основных гармоник без изменений коэффициентов.

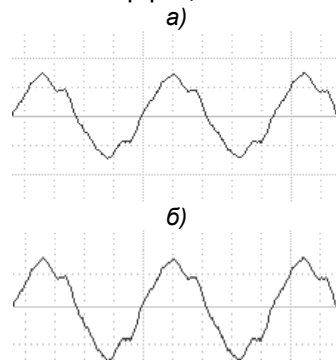


Рисунок 6 – Осциллограмма ВМП АД при отклонении параметров напряжения от показателей качества электроэнергии:
а – неисправность отсутствует;
б – несимметрия напряжений

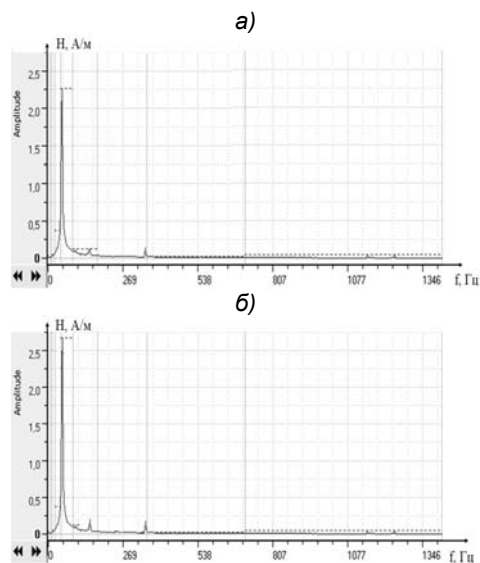


Рисунок 7 – Спектральный состав ВМП АД при отклонении параметров напряжения от показателей качества электроэнергии:
а – неисправность отсутствует;
б – несимметрия напряжений

Использование метода диагностики и прогнозирования асинхронных двигателей по их ВМП позволит внедрить технологию обслуживания электродвигателей «по состоянию», что является источником существенного повышения конкурентоспособности, рентабельности и прибыльности предприятия.

Суть технологии обслуживания «по состоянию» состоит в том, что обслуживание и

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

ремонт выполняются в зависимости от реального текущего технического состояния электродвигателя, контролируемого в процессе эксплуатации без каких-либо разборок и ревизий на базе контроля и анализа соответствующих параметров. При этом затраты на техническое обслуживание электродвигателей снижаются на 50-75 % в сравнении с обслуживанием «по регламенту» (система планово-предупредительных ремонтов) [6].

Таким образом, вопросы диагностики тесно связаны с прогнозированием состояний электрических машин, что позволяет судить об остаточном ресурсе, и, следовательно, появляется возможность разработать оптимальный режим работы для рассматриваемого электродвигателя, а в случае его отказа – минимизировать материальный ущерб.

Прогнозирование технического состояния (ТС) означает определение будущего состояния электрической машины на основании изучения тех факторов, от которых это состояние зависит. Прогнозирование может осуществляться как в процессе разработки, так и в период эксплуатации машины. В последнем случае целью прогнозирования является своевременное обнаружение неблагоприятного состояния машины и разработка рекомендаций по повышению уровня ее надежности.

Как известно, основополагающим принципом прогнозирования является использование прошлого опыта. Информация об электрической машине (априорная) является базой для процесса прогноза и получения оценок в будущем (апостериорные оценки).

Прогноз можно понимать как получение апостериорной оценки некоторого качества исследуемого явления на основе априорных сведений о прошлом и настоящем. Априорная информация является единственным основанием для определения модели исследуемого явления – детерминированной или стохастической.

В период эксплуатации апостериорной оценкой является надежность машины после проведения контроля ее состояния. Надежность, рассчитанная на предыдущем этапе, является априорной, а контроль рассматривается как опыт, по результатам которого оценивается апостериорная надежность.

Различают прогнозирование технического состояния и прогнозирование надежности. В первом случае дается прогноз технических параметров электрической машины, либо эти параметры относятся к тому или иному классу, а также дается прогноз отказов машины.

Во втором случае дается прогноз количественных показателей надежности машины на основе прогнозирования постепенных и внезапных отказов [7].

Наиболее точной методикой, позволяющей решать задачу прогнозирования сроков отказа, можно считать прогнозирование, использующее данные о текущем состоянии, полученные на основе результатов проведенной диагностики. При решении этой задачи можно воспользоваться следующей моделью

$$t_{\text{отк}} = t_y + T_{\text{ост}}, \quad (2)$$

где t_y – дата начала упреждения прогноза; $t_{\text{отк}}$ – дата отказа; $T_{\text{ост}}$ – прогнозный остаточный ресурс [8].

К решению задачи прогнозирования существуют два подхода – детерминированный и стохастический. В первом случае задача сводится к отысканию аппроксимирующего выражения, во втором – в качестве прогнозируемой характеристики принимается реализация случайной величины, определяющая интервал времени от момента контроля до первого пересечения поля допуска прогнозируемой величины. Поскольку процессы износа, старения и разрегулирования электрических машин, обуславливающие развитие постепенных отказов, являются случайными величинами, более общий характер носит стохастический подход.

В нем предполагается, что значение $T_{\text{ост}}$ определяется с учетом вида закона распределения остаточного ресурса Z , его параметров – математического ожидания M и коэффициента вариации v , а также заданной вероятностью безотказной работы $P(t)$

$$T_{\text{ост}} = f[Z, M, v, P(t)] \quad (3)$$

Эти параметры рассчитываются на основе анализа исходной информации о текущем ТС, полученной в результате проведенных диагностик. Наглядное отображение имеющейся статистической информации о техническом состоянии на момент проведения прогнозирования, который считается сроком начала упреждения прогноза t_y , представлено на рисунке 8.

Для решения задачи прогнозирования отказа, накопленная статистика по каждой i -той реализации преобразуется с целью представления ее в виде функции

$$T_{\text{ост}} = f(Y_T), \quad (4)$$

где Y_T – значение текущего ТС на момент упреждения прогноза t_y , соответствующего сроку последней диагностики.

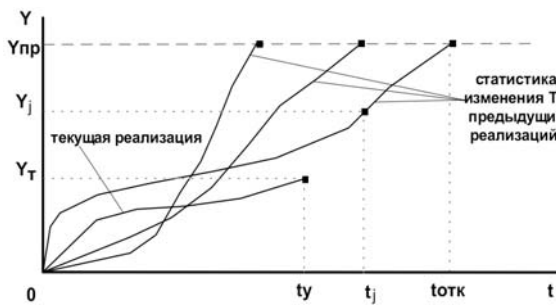


Рисунок 8 – Изменение технического состояния по n+1 реализациям

При формировании экспериментальной функции (4) для каждой j -той точки статистики используется выражение

$$T_{\text{ост}j} = t_{\text{отк}} - t_j, \quad (5)$$

где $t_{\text{отк}}$ – дата отказа; t_j – дата проведения j -той диагностики.

После такого преобразования получаем статистику оценки остаточного ресурса, характеризующую зависимость изменения $T_{\text{ост}}$ от текущего ТС. Графическое представление сформированной статистики показано на рисунке 9.

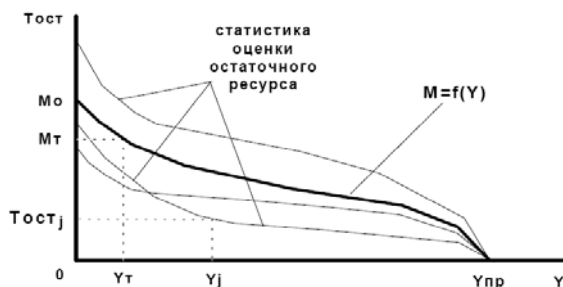


Рисунок 9 – Изменение остаточного ресурса $T_{\text{ост}}$ в зависимости от ТС

Используя значения $T_{\text{ост}}$ по каждой реализации, соответствующие началу эксплуатации при $Y = 0$, и, применяя традиционный аппарат математической статистики, определяем параметры: закон распределения остаточного ресурса Z и коэффициент вариации v .

Дальнейшая обработка этой статистики позволяет получить функцию для тренда (математического ожидания) остаточного ресурса в зависимости от значения текущего ТС – Y

$$M = f(Y). \quad (6)$$

Таким образом, в результате обработки статистики оценки остаточного ресурса получаем значения параметров: Z , $M(Y)$ и v , необходимых при прогнозировании.

При прогнозировании последовательно выполняются четыре этапа:

1. Используя оценку ТС Y_t (рисунок 10), на основании формулы (6) определяем математическое ожидание остаточного ресурса M_t .

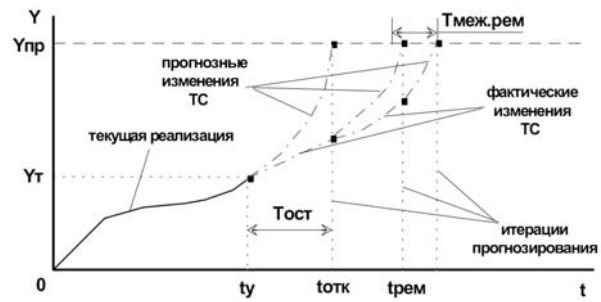


Рисунок 10 – Определение технического состояния по n+1 реализациям

2. Используя полученное значение M_t , известные значения Z и v , а также задавшись требуемой вероятностью безотказной работы $P(t)$, определяем остаточный ресурс $T_{\text{ост}}$ из выражения (3), используя традиционный аппарат математической статистики.

3. Из выражения (2) рассчитывается прогнозный срок отказа $t_{\text{отк}}$.

4. Исходя из стратегии ремонтов по ТС, в момент времени t_y осуществляется выбор вида воздействия ремонтной службы, в зависимости от результата сравнения значений $T_{\text{ост}}$ и временем межремонтного периода в производственном цехе $T_{\text{меж.рем}}$.

В момент $t_{\text{отк}}$ выполняется диагностика, если

$$T_{\text{ост}} - T_{\text{меж.рем}} > 0 \quad (7)$$

В момент t_y выполняется ремонт, если

$$T_{\text{ост}} - T_{\text{меж.рем}} \leq 0 \quad (8)$$

Следовательно, можно считать, что модель целесообразно использовать до выполнения условия (8), что соответствует времени ремонта $t_{\text{рем}}$. Таким образом, данная модель позволяет определять состояние электродвигателя в любой момент времени от начала эксплуатации до ремонта. Также было замечено, что наиболее точное прогнозирование срока отказа требует проведения нескольких диагностик [9].

Использование вихретокового метода контроля состояния асинхронных электродвигателей позволяет достаточно оперативно производить качественную оценку состояния межвитковой и межфазной изоляции электрических машин в процессе эксплуатации. При этом не требуются сложные средства вычислительной техники и высококвалифицированные специалисты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевчук, В. П. Обеспечение работоспособности электрических машин переменного тока в горнодобывающей промышленности [Текст] : дис.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

... канд. техн. наук / В.П. Шевчук. – М.: РГБ, 2005. – 308 с.

2. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Высшая школа, 1974. – 824 с.

3. Хомутов, С.О. Повышение эффективности восстановления и ремонта изоляции электродвигателей в агропромышленном комплексе [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С.О. Хомутов. – Барнаул, 1999. – 385 с.

4. Сафарбаков, А.М. Основы технической диагностики [Текст] : учеб. пособие для студентов / А. М. Сафарбаков, А. В. Лукьянов, С. В. Пахомов. – Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2006. – 215 с.

5. Филонов, М.В. Подходы к оценке остаточного ресурса технических объектов [Текст] / М.В. Филонов, А.С. Фурсов, В.В. Ключев // Контроль. Диагностика. – № 8. – 2006.

6. Бобров, В.В. Внешнее магнитное поле асинхронного двигателя как отголосок поля в зазоре [Текст] // Электроэнергетика в сельском хозяйстве: сборник трудов Международной научно-практической конференции / В.В. Бобров, И.Ю. Братухин, В.Н. Веденев, С.О. Хомутов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, - 2009.

7. Гемке, Р.Г. Неисправности электрических машин [Текст] : учеб. пособие для инженерно-технических работников / Р.Г. Гемке ; под общ. ред. Р.Б. Уманцева. – 9-е изд. – Л. : Энергия, 1989. – 336 с.

8. Справочник по электрическим машинам: том 2 /Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с., ил.

9. Ченцов, Н. А. Использование данных диагностики при прогнозировании срока отказа деталей механического оборудования [Текст] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сборник научных трудов / Н.А. Ченцов, В.Н. Ручко, С.Л. Сулейманов. – Донецк: Издательство ДонГТУ, -1998.

Бобров В.В., аспирант, кафедра «Электро-снабжение промышленных предприятий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8(3852) 24-37-62, E-mail: bobrov487@gmail.com;

Хомутов С.О., д.т.н., профессор, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8(3852) 29-07-61, E-mail: soh@mail.ru