

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРА НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. В. Бобров, С. О. Хомутов

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул

Прогресс современной науки и техники неразрывно связан с применением электрической энергии в различных производственных процессах.

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

От надежности асинхронных двигателей (АД) зависит реализуемость того или иного технологического процесса. Это вызвано тем, что выход из строя АД приводит к тяжелым авариям и большому материальному 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].

Основной принцип диагностики и прогнозирования состояния технических систем заключается в следующем:

1. последовательном и систематическом измерении определенных параметров систем;
2. выявлении изменений этих параметров в процессе эксплуатации и сравнении их с исходными;
3. прогнозировании изменения этих параметров [3].

Внедрение в эксплуатацию средств и методов технической диагностики позволяет:

повысить безотказность, ремонтпригодность и долговечность оборудования, предупредить аварии, прогнозировать остаточный ресурс и значительно увеличить надежность и экономичность энергетических установок. По статистическим данным, только за счет внедрения средств и методов диагностирования обеспечивается сокращение трудоемкости и времени ремонта оборудования на 30-40 % и увеличение коэффициента технического использования оборудования на 10-12 %.

Существующие на сегодняшний день методы диагностики не позволяют полноценно диагностировать оборудование во всех условиях эксплуатации, и, следовательно, не могут значительно повлиять на сокращение затрат, связанных с выходом из строя электродвигателей. В связи с этим разрабатываются новые методы диагностики АД, одним из которых является созданный на кафедре ЭПП АлтГТУ им. И. И. Ползунова метод диагностики асинхронных двигателей на основе анализа спектра напряженности их внешнего магнитного поля (ВМП).

В основе метода лежит гипотеза о взаимосвязи ВМП с полем в зазоре.

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 формула (1) зависимости эквивалентного поля в точке внутри АД, равноудаленной от полюсов обмотки статора и параметров электромашины.

$$H_v(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}\pi\delta} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_v}{2} \left\{ I_1 \frac{\sin N_1 v \frac{\alpha_1}{2}}{\sin v \frac{\alpha_1}{2}} \left[\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} v \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} v \right) \right] + \right. \\ \left. + I_2 \frac{\sin N_2 v \frac{\alpha_1}{2}}{\sin v \frac{\alpha_1}{2}} \left[\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} (v+1) \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} (v-1) \right) \right] + \right. \\ \left. + I_3 \frac{\sin N_3 v \frac{\alpha_1}{2}}{\sin v \frac{\alpha_1}{2}} \left[\sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} (v+1) \right) + \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} (v-1) \right) \right] \right\} \quad (1)$$

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРА НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

где ν – номер гармоники (от 1 до 5);
 δ – длина воздушного зазора;
 α_y – 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 качестве диагностического параметра выбраны коэффициенты гармоник $K_\nu = \frac{H_\nu}{H_1}$ [4].

При комплексном подходе к разработке метода диагностики необходимо учитывать все факторы, влияющие на внешнее магнитное поле электродвигателя. Этими факторами являются:

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

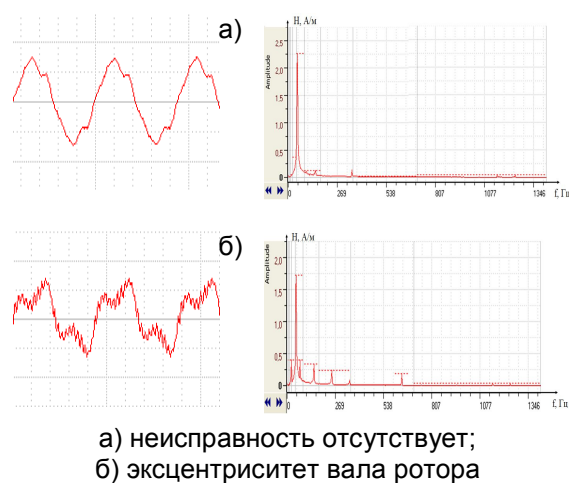


Рисунок 1 – Осциллограмма ВМП АД и спектральный состав при механических неисправностях

При механических повреждениях двигателя (неравномерность воздушного зазора при неисправностях подшипникового узла или искривлении вала) наблюдается возникновение четных гармоник в спектре ВМП, что видно на рисунке 1.

При электрических неисправностях двигателя происходит рост нечетных гармоник электродвигателя относительно 1-й. Это хорошо заметно на рисунке 2.

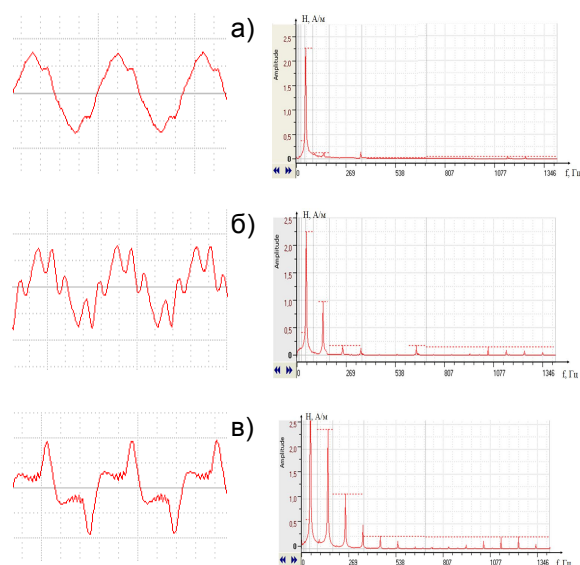


Рисунок 2 – Осциллограмма ВМП АД и спектральный состав при электрических неисправностях

При отклонении параметров напряжения от показателей качества электроэнергии на рисунке 3 наблюдается лишь рост амплитуды основных гармоник без изменений коэффициентов.

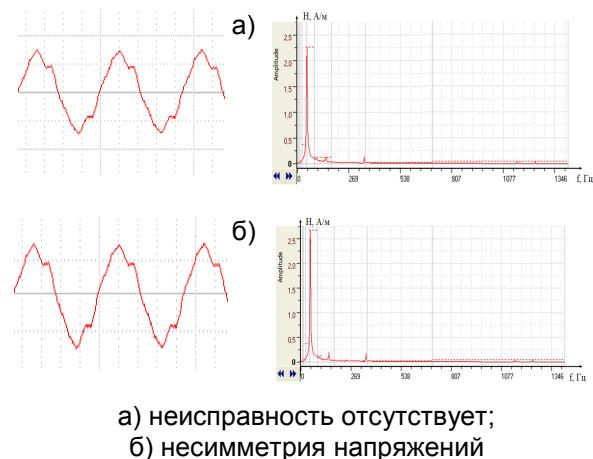


Рисунок 3 – Осциллограмма ВМП АД и спектральный состав при отклонении параметров напряжения от показателей качества электроэнергии

Использование метода диагностики и прогнозирования асинхронных двигателей по их ВМП позволит внедрить технологию обслуживания электродвигателей «по состоянию», что является источником существенно-

го повышения конкурентоспособности, рентабельности и прибыльности предприятия.

Суть технологии обслуживания «по состоянию» состоит в том, что обслуживание и ремонт выполняются в зависимости от реального текущего технического состояния электродвигателя, контролируемого в процессе эксплуатации без каких-нибудь 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) [5].

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 его надежности.

Основополагающим принципом прогнозирования является использование прошлого опыта. Информация о 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 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 [4].

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 [5].

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 определяются на основе анализа исходной информации о текущем ТС, полученные в результате проведенных диагностик. Наглядное отображение имеющейся статистической информации о ТС на момент проведения прогнозирования, который считается сроком начала упреждения

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРА НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

прогноза t_y , можно представить графически (рисунок 4).

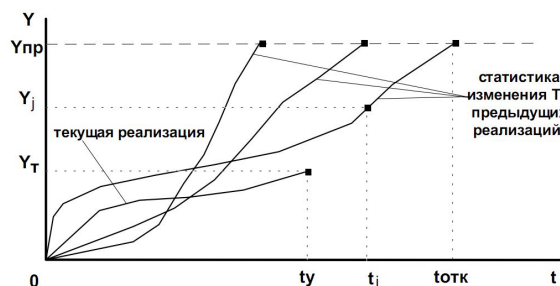


Рисунок 4 – Изменение ТС по $n+1$ реализациям

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

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

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

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

$$T_{OCT_j} = t_{OTK} - t_j, \quad (5)$$

где t_{OTK} – дата отказа;
 t_j – дата проведения j -той диагностики.

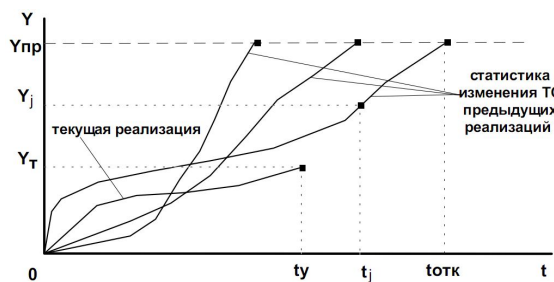


Рисунок 5 – Изменение ТС по $n+1$ реализациям

После такого преобразования получаем статистику оценки остаточного ресурса, характеризующую зависимость изменения T_{OCT} от текущего ТС. Графическое представление сформированной статистики показано на рисунке 5.

Используя значение T_{OCT} по каждой реализации, соответствующие началу эксплуатации детали при $Y=0$, и применяя традици-

онный 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.

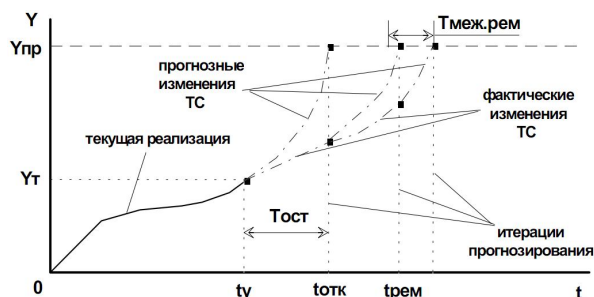


Рисунок 6 – Определение ТС по $n+1$ реализации

При прогнозировании последовательно выполняются четыре этапа:

1. Используя оценку ТС Y_T (рисунок 6), определяем математическое ожидание остаточного ресурса M_T , на основании выражения (6).

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

3. Непосредственное определение прогнозного срока отказа t_{OTK} рассчитывается из выражения (2).

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_{OCT} и времени межремонтного периода в производственном цехе $T_{МЕЖ.РЕМ.}$.

5. В момент t_{OTK} выполняется диагностика, если

$$T_{OCT} - T_{МЕЖ.РЕМ} > 0. \quad (6)$$

6. В момент t_y выполняется ремонт, если

$$T_{OCT} - T_{МЕЖ.РЕМ} \leq 0. \quad (7)$$

Следовательно, можно считать, что модель целесообразно использовать до выполнения условия (7), что соответствует времени ремонта $t_{\text{РЕМ}}$. Таким образом, данная модель позволяет определять состояние электродвигателя в любой момент времени от начала эксплуатации до ремонта, что значительно повлияет на оптимизацию его использования в этот промежуток времени. Также было замечено, что наиболее точное прогнозирование срока отказа требует проведения нескольких диагностик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шевчук, В. П.** Обеспечение работоспособности электрических машин переменного тока в горнодобывающей промышленности : дис. ... канд. техн. наук / В. П. Шевчук. – М. : РГБ, 2005. – 308 с.
2. **Вольдек, А. И.** Электрические машины : учеб. пособие для вузов / А. И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Высшая школа, 1974. – 824 с.
3. **Филонов, М. В.** Подходы к оценке остаточного ресурса технических объектов / В. В. Ключев, М. В. Филонов, А. С. Фурсов // Контроль. Диагностика 2006 № 8.
4. **Хомутов, С. О.** Внешнее магнитное поле асинхронного двигателя как отголосок поля в зазоре [Текст] / В. В. Бобров, И. Ю. Братухин, В. Н. Веденев, С. О. Хомутов // Электроэнергетика в сельском хозяйстве : Материалы Международной научно-практической конференции / Россельхозакадемия. Сиб. регион. отд-ние. – Новосибирск, 2009. – С. 289-292.
5. **Гемке, Р. Г.** Неисправности электрических машин : учеб. пособие для инженерно-технических работников / Р. Г. Гемке ; под общ. ред. Р. Б. Уманцева. – 9-е изд. – Л. : Энергия, 1989. – 336 с.
6. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т. 1 / И. П. Копылов, Б. К. Клоков – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
7. **Геллер, Б. Н.** Высшие гармоники в асинхронных машинах [Текст] / Б. Н. Геллер, В. Г. Гамата; под общ. ред. З. Г. Каганова. – пер. с англ. – М. : Энергия, 1981. – 352 с. : ил.
8. **Ченцов, Н. А.** Использование данных диагностики при прогнозировании срока отказа деталей механического оборудования [Текст] / В. Н. Ручко, С. Л. Сулейманов, Н. А. Ченцов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : Международный сборник научных трудов Прогрессивные технологии и системы машиностроения / Донецк : ДонГТУ, 1999. – Вып. 7. – с. 191-197.