

УДК 621.313.34

Ю.А. Ясинский, М.В. Левандовский, А.Н. Минко

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНО-СЛЕДСТВЕННОЙ СХЕМЫ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Сформулированы задачи технической диагностики подшипников, способствующей поддержанию на высоком уровне их эффективности и эксплуатационной надежности. Показано, что диагностирование подшипников должно осуществляться по диагностическим признакам и диагностическим параметрам, несущим информацию о техническом состоянии подшипников и позволяющим обнаруживать в них скрытые отказы, а также оценивать остаточный технический ресурс. Выделены методы диагностики по оценке вибраций и шумов, температурного режима, состояния и состава масла, как наиболее перспективные. Выделенные методы диагностики вполне соответствуют современному уровню и перспективам ее развития. Разработана структурно-следственная схема подшипников, позволяющая определить состав методов диагностики, по характеру физических процессов и степени износа подшипников выделить соответствующие им диагностические признаки, а по выбранным диагностическим признакам выбрать и обосновать необходимые комплексы диагностических параметров для оценки технического состояния подшипников и их остаточного технического ресурса. Предложены формулы для оценки времени диагностирования, остаточного технического ресурса подшипников.

**Ключевые слова:** техническая диагностика подшипников, задачи диагностики, диагностические признаки, диагностические параметры, структурно-следственная схема подшипников.

### Введение

#### Постановка задачи и анализ литературы.

Одним из важнейших условий поддержания на высоком уровне эффективности и надежности подшипников качения и скольжения, применяемых в электрических машинах, является своевременное обнаружение и предупреждение отказов, возникающих в процессе эксплуатации подшипников.

Эти задачи решает техническая диагностика подшипников. Диагностирование осуществляют по внешним признакам (люфтам, вибрациям, нагревам, шумам, изменением состава пленок масла), несущим информацию о техническом состоянии подшипников. Это позволяет, во-первых, обнаружить скрытые отказы и применить для их устранения ремонт подшипников, а также, во-вторых, при отсутствии отказов выявить ресурс исправной работы подшипников и необходимость в профилактике.

Обнаружение и последующее устранение неисправностей и своевременная профилактика позволяют снизить интенсивность процессов изнашивания подшипников, повысить вероятность их безотказной работы, а также исключить преждевременный и поздний (аварийный) ремонт.

Анализ литературных источников, в частности [1 – 6], выполненный нами, показывает, что разработано и применяется несколько методов технической диагностики подшипников качения и скольжения. Применительно к подшипникам качения доминирующими являются методы диагностики, в которых используется оценка вибраций и шумов [2], оценка состояния и состава масла [4]. Применительно к подшипникам скольжения основными метода-

ми диагностики являются оценка вибраций [5], температурного режима [6].

Недостатками технической диагностики подшипников в существующем ее состоянии являются разрозненность методов (в литературных источниках описывается один, максимум два метода), а также отсутствие их взаимосвязи.

Эти недостатки существенно снижают эффективность диагностики.

**Целью данной статьи** является разработка структурно-следственной схемы подшипниковых узлов, на основе которой, по нашему мнению, можно разработать систему их диагностики, которая позволит поддерживать на высоком уровне надежность и долговечность подшипников.

### Основной материал

Структурно-следственная схема включает в себя элементы подшипников, параметры их технического состояния, диагностические признаки и диагностические параметры. Схема представлена на рис. 1.

Параметрами технического состояния подшипников называем физические величины, определяющие связь и взаимодействие между элементами подшипника и его функционирование в целом.

В процессе эксплуатации параметры технического состояния подшипников изменяются от номинальной  $X_{ном}$  (или начальной после приработки) до предельной величины  $X_{пред}$ . При этом изменяются и показатели рабочей характеристики подшипника от величин, соответствующих новому изделию, до величин, соответствующих изделию, непригодному к дальнейшему использованию.

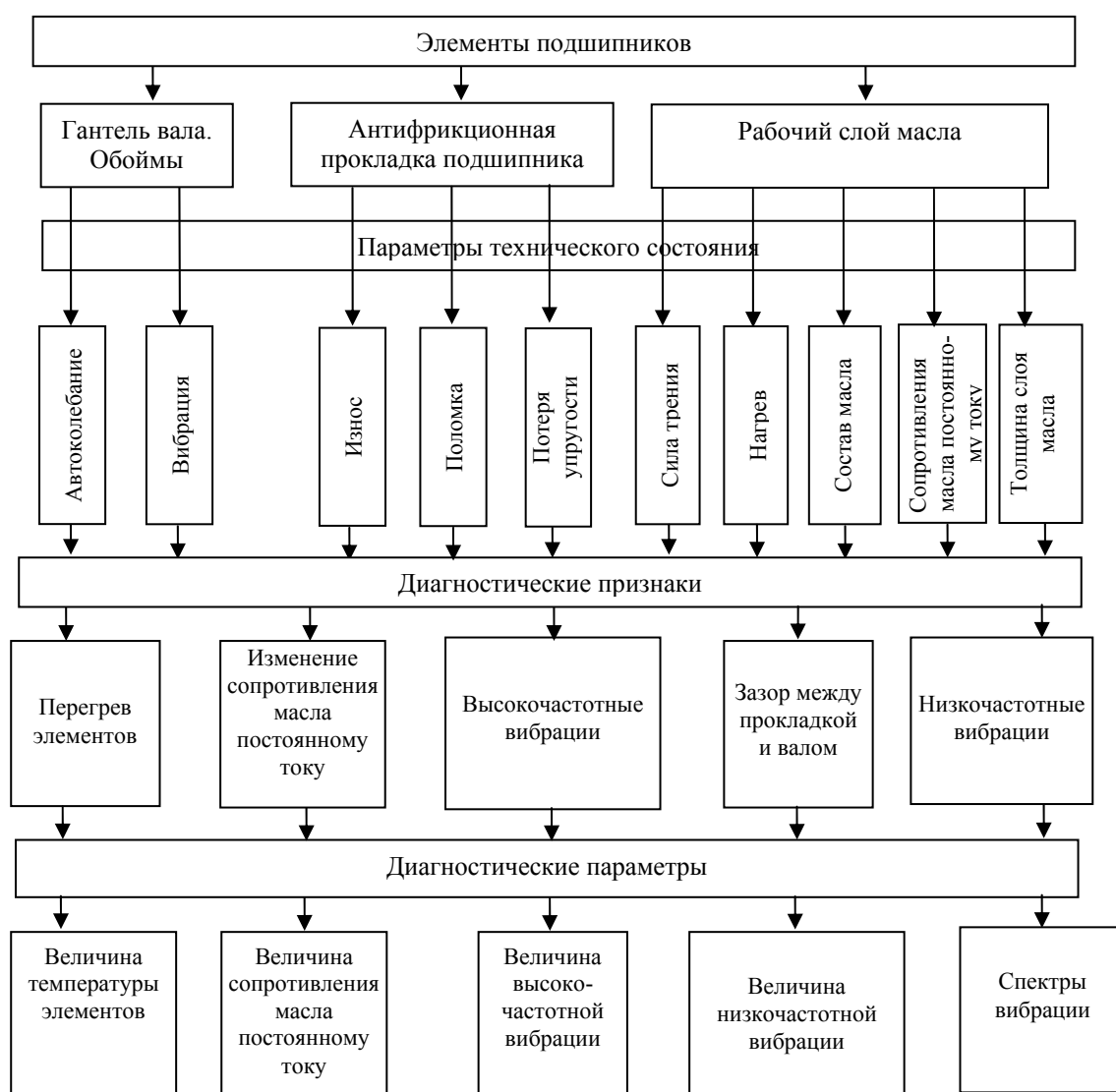


Рис. 1. Структурно-следственная схема элементов подшипников

**Научная новизна данной статьи** состоит в разработке и применении для диагностики подшипников структурно-следственной схемы его элементов.

Каждый из диагностических признаков можно количественно оценивать при помощи соответствующих диагностических параметров.

Эффективность работы подшипников можно оценивать по параметрам технического состояния:

- автоколебаниям и вибрация галтели вала и обойм (подшипника качения);
- износу и потере упругости антифрикционной прокладки (подшипника скольжения);
- сила трения и состав масла.

Такие параметры дают обобщенную информацию о состоянии подшипника в целом, являющуюся основой для дальнейшей поэлементной диагностики:

- перегрев элементов;
- изменение сопротивления постоянному току масла;
- высокочастотные и низкочастотные вибрации элементов.

Сопутствующие процессы в подшипниках можно оценить при помощи таких диагностических па-

раметров, как величина, скорость и ускорение вибраций, степень и скорость нагрева, концентрация в масле продуктов износа. Эти параметры дают более узкую, конкретную информацию о техническом состоянии диагностируемого подшипника. Диагностические параметры, также как и параметры технического состояния, являются переменными случайными величинами и имеют соответствующие номинальные (или начальные)  $S_{ном}$  и предельные значения  $S_{пред}$ .

Начальная величина диагностического параметра характеризует кондицию подшипника. Его величину можно определить по среднему значению измерений данного диагностического параметра и совокупности заведомо исправных подшипников.

Предельную величину диагностического параметра можно определить на основе закона ее распределения для подшипников данной совокупности в период нормальной их эксплуатации (то есть после приработки до начала прогрессирующего изнашивания).

Как правило, техническое состояние подшипников обуславливается совокупностью параметров технического состояния, озвученных на рис. 1.

Однако, ввиду различной их значимости техническое состояние подшипников (вследствие относительной простоты их конструкции) практически зависит от одного или немногих основных (критических) параметров.

Предельные величины параметров технического состояния подшипников обусловлены вероятностью возникновения их неисправности или недопустимого снижения рабочих характеристики, прогрессивного роста износов подшипников. При диагностике подшипников преимущественно необходимо использовать те их параметры технического состояния, которые в первую очередь определяют отказ. Согласно рис. 1 этими параметрами являются автоколебания и вибрации. Возможность прямого измерения параметров технического состояния, а, следовательно, и возможность их непосредственного использования для диагностики, весьма ограничена. Поэтому при диагностике эти параметры, по крайней мере, до настоящего времени, измеряют косвенно, используя выходные (рабочие) и сопутствующие процессы, порождаемые функционирующими подшипниками. Указанные процессы, будучи функционально связанными техническим состоянием подшипников, содержат необходимую для диагностики информацию. Они называются диагностическими признаками (см. рис. 1).

Так как в этот период интенсивность отказов подшипника примерно постоянна, то плотность распределения диагностического параметра  $f(S)$  относится к практически исправному подшипнику. Поэтому неисправным подшипником можно считать такой, у которого диагностический параметр превышает величины, входящие в 95 % случаев его распределения. На основе этого величину  $S_{\text{пред}}$  можно принять равной ее граничному значению АВ между исправным и неисправным подшипником.

По мере ухудшения технического состояния подшипников диагностические параметры могут либо увеличиваться (вибрации), либо уменьшаться (сопротивление пленки масла постоянному току). Определенная связь между диагностическими и параметрами технического состояния подшипников позволяет количественно оценить их исправность и работоспособность. Для того чтобы обеспечить достоверность, экономичность и стабильность результатов, диагностические параметры должны отвечать требованиям однозначности, воспроизводимости, чувствительности или информативности [4].

Однозначность диагностического параметра означает, что все его текущие значения (в интервале изменений технического состояния подшипников от некоторого начального  $X_{\text{ном}}$  до предельного  $X_{\text{пред}}$  значения) однозначно соответствуют параметрам технического состояния, то есть зависимость  $S = f(X)$  в указанном интервале не имеет экстремума.

Воспроизводимость (или стабильность) диагностического параметра определяется дисперсией его величин, многократно измеренных с заданной точностью.

Чувствительность или информативность диагностического параметра оценивается величиной и скоростью его приращения при достаточно малом изменении параметра технического состояния.

Указанные качества диагностических параметров, а, следовательно, и достоверность результатов диагностики в значительной степени зависят от режимов работы подшипников.

**Процесс диагностирования подшипников.** Процесс диагностирования заключается в восприятии диагностических параметров ( $S_1, S_2, \dots, S_n$ ), измерении их величин, определяющих в известном масштабе параметры технического состояния ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ) подшипников и выдачи заключения на основе сопоставления измеренных величин с упреждающими ( $S_{y1}, S_{y2}, \dots, S_{yn}$ ) или предельными ( $S_{\text{пред}1}, S_{\text{пред}2}, \dots, S_{\text{пред}n}$ ) величинами.

Процесс восприятия и измерения диагностических параметров показан на рис. 2.

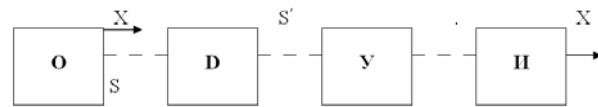


Рис. 2. Схема процесса диагностирования

Объект диагностики О имеет техническое состояние, характеризующееся параметром  $X$ . Функционируя, он порождает соответствующий диагностический параметр  $S$ . Этот параметр воспринимается при помощи какого-либо одного или нескольких датчиков Д (механических, тепловых, электрических, индукционных и др.). От датчика параметр в трансформированном виде  $S'$  поступает в устройство У для соответствующей обработки (усиления, расчленения, дешифровки, анализа и т. п.) и далее в измерительное устройство И, где измеряется параметр  $X$  технического состояния в определенном масштабе  $\alpha$  при помощи прибора (стрелочного типа, индикатора, диаграммы и т. п.).

Время  $t_d$ , необходимое для диагностирования одного подшипника, определится из выражения:

$$t_d = t_{\text{всп}} + t_{\text{од}} + t_{\text{п.р.}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{всп}}$  – вспомогательное время;  $t_{\text{од}}$  – основное время диагностирования;  $t_{\text{п.р.}}$  – время принятия решения.

Вспомогательное время  $t_{\text{всп}}$  необходимо для выполнения работ в процессе подготовки и после проведения диагностирования. Основное время диагностирования необходимо для подачи диагностируемый подшипник воздействующих сигналов, успокоение измерительной системы, переключение ручек управления, считывание показаний приборов. Если в процессе диагностирования необходимо определить неисправность в подшипнике, то в основное время входит также и время, затрачиваемое на поиск неисправностей.

Вспомогательное время  $t_{\text{всп}}$  составляет 50 – 80% общих затрат времени на диагностирование [4]. Его можно сократить улучшением приспособленности подшипников к диагностированию, а также раз-

работкой методов определения технического состояния подшипников по ограниченному числу диагностических параметров, выбранных из структурно-логической схемы (см. рис. 1).

Резервом уменьшения основного времени диагностирования  $t_{од}$  является автоматизация процесса проведения измерений. Резервом уменьшения времени принятия решения  $t_{п.р.}$  является автоматизация обработки результатов измерений.

Для оценки соотношения времен  $t_{д.}$ ,  $t_{всп.}$ ,  $t_{од}$  и  $t_{п.р.}$  целесообразно воспользоваться выражением для определения коэффициента приспособленности объекта диагностики  $k_{прб.}$ , предложенным в [4]:

$$k_{прб.} = (t_{од} + t_{п.р.}) / (t_{всп.} + t_{од} + t_{п.р.}) = (t_{од} + t_{п.р.}) / t_{д.} \quad (2)$$

Чем ближе значение коэффициента приспособленности  $k_{прб.}$  к единице, тем подшипники более доступны к диагностированию.

Основной задачей прогнозирования при осуществлении диагностики подшипников является определение их остаточного ресурса. Для ориентировочной оценки технического состояния подшипника можно пользоваться понятием коэффициента технического ресурса  $k_{ост.}$  [1]. В нашем случае с помощью этого коэффициента можно оценить остаточный ресурс как элементов подшипника, так и его в целом:

$$k_{ост.} = (P_{пред} - P_{изм}) / (P_{пред} - P_{ном}), \quad (3)$$

где  $P_{пред}$  – предельное изменение диагностического параметра;  $P_{изм}$  – измеренное значение диагностического параметра;  $P_{ном}$  – номинальное значение диагностического параметра.

Формула (3) пригодна для случая, когда в процессе эксплуатации значение диагностического параметра увеличивается. В обратном случае рекомендуем использовать следующую формулу:

$$k_{ост.} = (P_{изм} - P_{пред}) / (P_{ном} - P_{пред}). \quad (4)$$

Для нового элемента или подшипника  $k_{ост.} = 1$ , а для полностью исчерпавшего свой ресурс –  $k_{ост.} = 0$ .

## Выводы

Разработано и применяется несколько методов диагностики подшипников скольжения и качения, применяемых в электрических машинах. Эти методы применяются разрозненно, а потому малоэффективно.

Обоснована и предложена структурно логическая схема определения параметров технического состояния, диагностических признаков и диагностических параметров, позволяющих наиболее полно оценить техническое состояние подшипников в эксплуатации. Рассмотрена схема процесса диагностики, на основе которой может быть разработана система диагностики подшипников. Предложены формулы для оценки времени диагностирования, степени доступности подшипников к диагностированию, а также для определения остаточного ресурса подшипников.

## Список литературы

1. Кирса В.И. Прогнозирование технического состояния машин / В.И. Кирса. – К.: Урожай, 1988. – 72 с.
2. Камнев В.С. Подшипники качения в электрических машинах / В.С. Камнев. – М.: Госэнергоиздат, 1972. – 70 с.
3. Михлин В.М. Указания по определению остаточного ресурса элементов машин / В.М. Михлин, А.А. Сельцер, В.В. Подкопаев. – М.: ГОСНИТИ, 1978. – 115 с.
4. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования / В.П. Таран. – К.: Техніка, 1983. – 200 с.
5. Подшипник скольжения для высоких нагрузок / И.В. Барцев, В.И. Музалевский, А.К. Тарасов, В.В. Савва // Компрессорная техника и пневматика. – 2001. – № 6. – С. 12-13.
6. Баткис Г.С. Опорные и упорные подшипники скольжения с самоустанавливающимися подушками для центробежных насосов / Г.С. Баткис, В.К. Хайсанов, В.А. Максимов // Компрессорная техника и пневматика. – 2001. – № 6. – С. 16-19.

Поступила в редколлегию 23.04.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.Н. Фоменко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков/

## РОЗРОБКА СТРУКТУРНО-СЛІДЧОЇ СХЕМИ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДШИПНИКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Ю.О. Ясинський, М.В. Левандовський, О.М. Минко.

*Сформульовані задачі технічної діагностики підшипників, які сприяють підтриманню на високому рівні їх ефективності та експлуатаційної надійності. Показано, що діагностування підшипників повинно здійснюватися по діагностичним ознакам і діагностичним параметрам, які несуть інформацію про технічний стан підшипників та дозволяють виявляти у них скриті відмови, а також оцінювати остаточний технічний ресурс. Виділені методи діагностики по оцінюванню вібрацій та шумів, температурного режиму, стану та складу мастила як найбільш перспективні. Виділені методи діагностики відповідають сучасному рівню та перспективам її розвитку. Запропоновані формули для оцінки часу діагностування, остаточного технічного ресурсу підшипників.*

**Ключові слова:** технічна діагностика підшипників, задачі діагностики, діагностичні ознаки, діагностичні параметри, перспективні методи діагностики, структурно-слідча схема підшипників.

## DEVELOPMENT OF STRUCTURALLY-INVESTIGATION CHART OF DIAGNOSTIC PARAMETERS OF BEARINGS OF ELECTRIC MACHINES

Yu.A. Yasinskiy, M.V. Levandovskiy, A.N. Minko

*The tasks of technical diagnostics of bearings, cooperant maintenance at high level of their efficiency and operating reliability are formulated. Ostensible, that diagnosing of bearings must be carried out on diagnostic signs and diagnostic parameters, to bearings information about the technical state of bearings and allowing to find out in them the hidden refusals, and also estimate a remaining technical resource. The methods of diagnostics are selected as evaluated by vibrations and noises, temperature condition, state and composition of butter, as most perspective. The selected methods of diagnostics fully correspond a modern level and prospects of its development. Formulas are offered for the estimation of time of diagnosing, remaining technical resource of bearings.*

**Keywords:** technical diagnostics of bearings, tasks of diagnostics, diagnostic signs, diagnostic parameters, perspective methods of diagnostics, structurally-investigation chart of bearings.