

А.Е. Проволоцкий, Т.М. Кадильникова

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматриваются технические средства диагностирования зубчатых передач и методы получения первичной информации.

диагностика, зубчатые передачи, первичная информация, средства измерения

Зубчатые передачи являются одной из основных частей машин различного назначения, от их качества зависят основные характеристики машин. К настоящему времени достигнут определенный прогресс в их проектировании и технологии изготовления, исследованы вопросы их надежности при интенсивной эксплуатации [1 – 3], однако в области теории и технических средств диагностирования наблюдается заметное отставание. Это отставание вызвано, во-первых, сложностью методов получения первичных информационных сигналов, так как требует для их построения привлечения разнообразных физических явлений (акустических, тепловых, тензометрических, лазерных), во-вторых, необходимостью получения таких свойств этих средств измерения, которые бы могли производить прямые, а не косвенные измерения и, последнее, не менее важным является требование удобства монтажа первичных средств измерения систем диагностики в малых замкнутых объемах без нарушения конструкции механизмов.

Успех внедрения средств вычислительной техники в системах диагностики зубчатых передач во многом зависит от наличия и качества средств отбора первичной информации, которые должны обладать информативной надежностью, высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками, удобством монтажа, а также возможностью проводить диагностику, не прерывая эксплуатации машины.

В настоящее время диагностирование зубчатых передач идет по пути использования упрощенных диагностических моделей, основное содержание которых состоит в распознавании дефектов по отслеживанию амплитуд вибрации на вычисленных информативных частотах появления возможного дефекта, а прогнозирование сводится к определению тенденций развития дефекта, в предположении постоянной скорости его изменения. Данные положения не всегда позволяют объяснить внезапные изменения технического состояния машин стационарного режима работы и абсолютно недостаточны для описания процессов, происходящих в механизмах с динамическим режимом нагружения. В реальном механизме наличие вибрации – это следствие комплекса причин: состояния элементов и узлов механизма; степени их износа, технологических параметров процесса, качества технического обслуживания. Каждый из этих факторов может стать основной причиной вибрации. Задача диагностики сводится к определению причины и способа устранения либо уменьшения уровня вибрации. Сложной проблемой является распознавание основного источника при одновременном проявлении нескольких причин. Зачастую гораздо более практичным является предварительное исследование механизма с использованием комплекса портативных диагностических приборов контроля взаимодополняющих параметров вибрации. Эти методы, несмотря на незначительную глубину поиска дефекта, позволяют получить первое предупреждение о происходящих изменениях в механизме при условии правильного выбора диагностических параметров.

Техническое состояние любой, даже практически идеально изготовленной зубчатой пары, может быть оценено в процессе работы при помощи сигналов датчиков скорости вращения (ДСВ). Значение таких измерительных преобразователей, как ДСВ, для систем диагностики чрезвычайно велико, так как весьма широк круг объектов, имеющих вращающиеся детали, а современные средства электроники и микропроцессорной техники позволяют при обработке выходных сигналов датчиков получать достоверную информацию не только о мгновенной и средней скоростях вращения, о моменте на валу, об ускорении вращения, но и о биениях, кинематической погрешности, поломках и износе зубьев.

Диапазон конструктивных решений ДСВ широк и особенности конст-

рукции контролируемых объектов весьма разнообразны. Особое место среди ДСВ занимают электромагнитные датчики, которые в отличие от фотоэлектрических, а также датчиков, основанных на других физических эффектах, имеют такие привлекательные особенности как возможность эксплуатации в условиях загрязненной и агрессивной среды, высокую эксплуатационную и информационную надежность, возможность изучать информацию о физическом состоянии металла зубьев. Монтаж электромагнитных ДСВ не требует значительных конструктивных изменений в контролируемом объекте, так как основной частью ДСВ является сам вращающийся вал, шестерня или зубчатое колесо, выполняющие трансмиссионные функции.

Феррозондовый метод позволяет контролировать изделие любых размеров и форм, если их отношение длины к наибольшему размеру в поперечном направлении и их магнитные свойства дают возможность намагничивания до степени достаточной для создания магнитного поля рассеяния дефекта, обнаруживаемого с помощью феррозондового преобразователя (ФП).

Выбор феррозондов в качестве индикаторов магнитного поля рассеяния над дефектами в намагниченной детали обусловлен целым рядом преимуществ по сравнению с другими магниточувствительными элементами: малая потребляемая мощность, незначительные габариты, сравнительная простота в изготовлении, высокая надежность работы, большая помехоустойчивость, высокий коэффициент полезного действия и избирательность к локальным полям рассеяния. Чувствительность метода определяется магнитными характеристиками материала контролируемого изделия, его формой и размерами, способами контроля и видом намагничивания, чувствительностью применяемого ФП, устройством обработки выходного сигнала ФП, а также магнитным полем рассеяния дефекта. В зависимости от размеров выявляемых поверхностных и подповерхностных дефектов, а также глубины их залегания устанавливаются пять условных уровней чувствительности для феррозондового метода (табл. 1).

Минимальная длина выявляемого дефекта 2 мм и более. При скоростном автоматизированном контроле длина выявляемых дефектов определяется также шагом сканирования ФП.

Магнитоферрозондовый метод контроля предусматривает следующие

Таблица 1

Уровни чувствительности феррозондовых дефектоскопов

Условные уровни чувствительности	Минимальные размеры выявляемых дефектов, мм		Максимальная глубина дефекта, мм
	Ширина (раскрытие)	Глубина	
Поверхностные			
А	0,1	0,2	-
Б	Св. 0,1 до 0,5	Св. 0,2 до 1,0	-
Подповерхностные			
В	0,3	0,5	10,0
Г	0,3	Св. 0,5 до 1,0	10,0
Д	Св. 0,3 до 0,5	Св. 0,5 до 1,0	5,0

технологические операции: очистку поверхности и подготовку изделия к контролю; намагничивание контролируемого изделия; сканирование и получение сигнала от дефекта; размагничивание. Достоинством феррозондового метода контроля является возможность полностью автоматизировать процесс контроля, увеличить его производительность и исключить субъективный фактор. К безусловным достоинствам феррозондового метода следует отнести его высокую чувствительность: в то время как магнитопорошковый метод требует напряженности поля рассеяния 150-160 А/см, ФД уверенно работают при напряженности магнитного поля дефекта 5-10 А/см, что позволяет с их помощью устанавливать не только поверхностные и подповерхностные дефекты, но и залегающие на глубине 10-15 мм под поверхностью изделия. В неавтоматическом режиме применение феррозондового метода нецелесообразно, так как вручную очень сложно и долго сканировать контролируемую деталь. Однако для контроля ограниченных зон поверхности детали, в которых наиболее вероятно появление дефектов, феррозондовый метод в ручном режиме может быть достаточно эффективным и производительным. К недостаткам ФД следует отнести сложную многоканальную электронную аппаратуру и тот факт, что в автоматическом исполнении они применяются для контроля гладких деталей в форме тел вращения.

Трудность использования феррозондового метода для контроля крупногабаритных зубчатых колес, какими являются зубчатые колеса тяговых редукторов подвижного состава, заключается в том, что зубья зубчатых колес дают дополнительный градиент поля, который накладывается на поле дефектов и снижает надежность контроля, а также в том, что трудно осуществить контроля зубчатого колеса непосредственно во впадинах зубьев. Однако последний недостаток при введении компенсации краевого эффекта может успешно применяться для контроля зубчатых колес тяговых редукторов. Новые аморфные сплавы упрощают технологию изготовления феррозондов, а новые методы обработки их выходных сигналов значительно упрощают аппаратуру обслуживания одного измерительного канала.

В настоящее время существует довольно много приборов (дефектоскопов, магнитометров, измерителей магнитной индукции и т.п.), в которых используется в качестве магниточувствительного элемента феррозонд. Блок-схема наиболее распространенного вида феррозондового дефектоскопа приведена на рис. 1.



Блок-схема феррозондового дефектоскопа

Обнаружение усталостных трещин, возникающих во время эксплуатации на поверхностях сложной формы, таких как резьбовые соединения, зубчатые передачи, радиусные переходы можно контролировать при помощи приборов МД-40К, МД-41К [4-6], которые успешно эксплуатируются в различных отраслях промышленности. С учетом накопленного опыта их эксплуатации разработаны модернизированные дефектоскопы типа МД-42К. Контролируемый участок зуба локально намагничивают

переменным полем, а о дефекте судят по изменению поперечной тангенциальной составляющей магнитного поля. Локальное намагничивание осуществляется синусоидальным током, подводимым к контролируемой поверхности с помощью двух токовых электродов таким образом, чтобы прямая, проходящая через точки касания этих электродов, составила некоторый угол δ с вероятным направлением распространения усталостной трещины по витку зуба. На рис. 2 изображено взаимное расположение токовых электродов оси первичного преобразователя – ферроэлемента и контролируемой поверхности зуба.

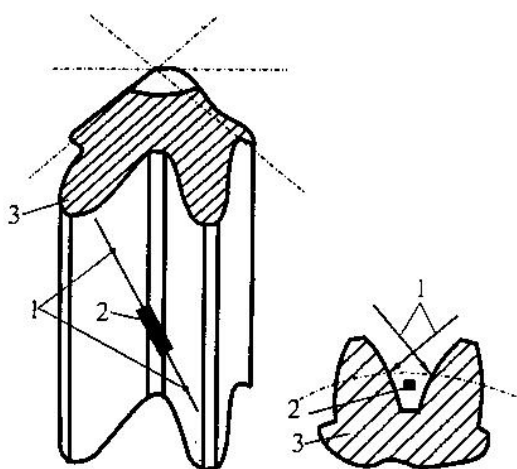


Рис. 2. Взаимное расположение токовых электродов, ферроэлемента и контролируемой поверхности зуба: 1 – точки касания токовых электродов; 2 – ферроэлемент; 3 – контролируемая поверхность зуба

Преобразователь прибора МД-41К выполнен в виде корпуса, в котором размещены подпружиненные токовые электроды, ферроэлемент и механизм перестройки ориентации оси ферроэлемента относительно линии, соединяющей точки касания токовых электродов. В преобразователе предусмотрены направляющие, обеспечивающие фиксацию его во впадине между зубьями заданного модуля. Токовые электроды при установке преобразователя во впадине опираются на смежные поверхности профиля зуба выше средней линии на 1-2 мм. Локальное намагничивание осуществляется переменным током промышленной частоты 50 Гц и амплитудой до

5 А. В качестве первичных преобразователей используется один ферроэлемент длиной 2 мм и наружным диаметром 0,2 мм. С целью повышения чувствительности и помехоустойчивости прибора обработка информации о дефекте ведется по амплитуде и фазе первой гармоники огибающей, модулирующее вторую гармонику ЭДС, наведенной во вторичной обмотке ферроэлемента.

При установке преобразователя на заведомо бездефектный участок производится настройка ферроэлемента с помощью перестройки так, чтобы магнитное поле рассеяния, обусловленное намагниченным током, минимально воздействовало на сердечник ферроэлемента. Вследствие этого ЭДС высокой частоты, наводимая в измерительной обмотке ферроэлемента, не модулирована намагничивающим низкочастотным полем. При прохождении преобразователя над дефектным участком, например над усталостной трещиной, расположенной вдоль впадины у корня ножки зуба, результирующее магнитное поле деформируется и появляется поперечная тангенциальная составляющая, воздействующая на сердечник ферроэлемента. В результате на измерительной обмотке ферроэлемента ЭДС высокой частоты оказывается промодулированной частотой намагничивающего поля. Из спектра ЭДС, наведенной в измерительной обмотке ферроэлемента, выделяется вторая гармоника возбуждающего тока. После детектирования и фильтрации от высших гармоник первая гармоника огибающей усиливается и поступает в блок амплитудно-фазовой обработки и далее на устройство световой сигнализации.

Дефектоскопы МД-42К предназначены для обнаружения поверхностных трещин в зубьях стальных прямо- и косозубых цилиндрических зубчатых колес диаметром от 200 мм и более с нормальными модулями зацепления 4,5; 5,0; 6,0; 8,0 мм; галтельных переходах деталей с радиусом кривизны от 6 до 30 мм и минимальным диаметром 200 мм; резьбовых участков болтов, шпилек, крюков и других ответственных деталей диаметром не менее 28 мм, изготовленных из ферромагнитных сталей. Шаг контролируемой резьбы (метрической, дюймовой, треугольной, трубной) от 2 до 12 мм, трапецеидальной – 3, 5, 8, 12 мм. Шероховатость поверхности контролируемых деталей в пределах $R_z = 40$.

С помощью дефектоскопов обнаруживаются поверхностные дефекты

типа усталостных трещин:

- по поверхности впадин зуба, ограниченной делительной окружностью, ориентированные вдоль зуба или под углом 30° к образующей и удаленные от края изделия не менее чем на 25 мм;
- вдоль нитки резьбы в глубине впадины, ограниченной средним диаметром метрического, дюймового и треугольного профиля, а также ориентированные под углом до 15° к образующей резьбы;
- во впадине резьбы трапецеидального профиля (с шагом до 5 мм) или в углах впадины (с шагом более 5 мм);
- на поверхности средней части радиусного галтельного перехода шириной 5 ± 1 мм и ориентированные вдоль образующей галтельного перехода или под углом к ней до 15° .

В зависимости от назначения дефектоскопы разработаны в четырех модификациях. Дефектоскоп ГСП МД-42К предназначен для обнаружения усталостных трещин в резьбе метрического, дюймового, треугольного профилей. Для контроля трапецеидальной резьбы предназначен дефектоскоп ГСП МД-42-01, для контроля зубчатых колес – ГСП МД-42_02, для обнаружения усталостных трещин на радиусных переходах – ГСП МД-42_03. Локальное намагничивание также осуществляется переменным током промышленной частоты амплитудой до 6А.

На рис. 3 изображено взаимное расположение токопроводящих электродов и контролируемой поверхности.

В одних случаях (например, при контроле резьбы с малым шагом, или радиусных переходов) токопроводящие электроды проходят по нормали к контролируемой поверхности, в других (например, при контроле зубьев крупного модуля) – составляют с контролируемой поверхностью угол, отличающийся от 90-градусного, что обуславливает наличие начального уровня сигнала даже при точной настройке ферроэлемента. Поэтому в дефектоскопе применена амплитудно-фазовая обработка информации, получаемой с огибающей, которой модулируется вторая гармоника высокочастотного сигнала.

В комплект дефектоскопа, кроме четырех преобразователей, входят выносной индикатор дефекта и имитаторы. Последние служат для проверки работоспособности прибора и представляют собой проводник, с помо-

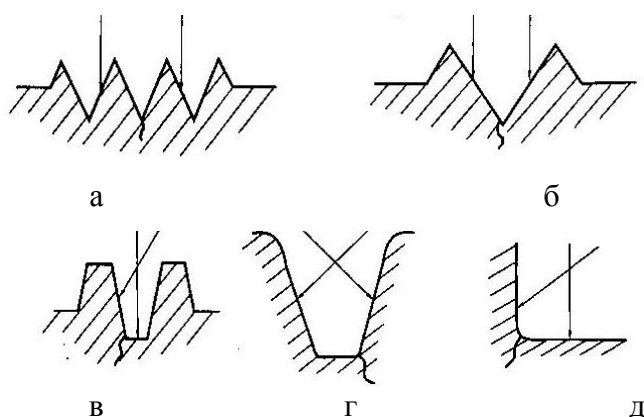


Рис. 3. Расположение токопроводящих электродов на контролируемой поверхности :

- а – резьбы метрического профиля с шагом до 2,5 мм;
 б – резьбы 3 – 12 мм; в – резьбы трапецидального профиля с шагом 8 – 12 мм; г – зубьев зубчатого колеса;
 д – галтелей переходных поверхностей

щью которого моделируется поле дефекта.

Проверка работоспособности дефектоскопа проводится в следующей последовательности: имитатор с помощью специальных направляющих фиксируется на преобразователе, при этом прямой проводник имитатора проходит на расстоянии 6-8 мм от ферроэлемента и составляет с его осью угол 3-5°; при пропускании по этому проводнику тока возникает магнитное поле, поперечная составляющая которого будет эквивалентна полю от дефекта минимальной глубины.

В приборе предусмотрен режим проверки работоспособности с помощью дополнительной фазосдвигающей цепочки RC, обеспечивающей постоянный фазовый сдвиг, равный 15°.

Замена настроечных образцов имитаторами предложенной конструкции позволила повысить метрологические параметры прибора и исключить комплекты настроечных образцов, прикладываемые к прибору. Для обнаружения дефектов с минимальными размерами разработана технологическая инструкция на изготовление настроечных образцов, по которой потребитель сможет воспроизвести эти образцы с учетом специфики контролируемых объектов. Один из примеров ее реализации описан в [6].

В приборе предусмотрен выход для подключения внешнего милливольтметра, с помощью которого можно проводить количественную оценку по первой гармонике огибающей, поступающей на вход синхронного детектора. Это необходимо, например, при изучении усталостных накоплений, скорости роста усталостных трещин.

Дефектоскопы МД-42К находят применение не только для обнаружения усталостных трещин в узлах и деталях действующих машин и механизмов, как и приборы МД-40К и МД-41К, но и для изучения, например, усталостных накоплений при малоцикловых испытаниях [6], что позволяет уточнить механику их разрушения. Приборы вошли в нормативно-техническую документацию по дефектоскопии многих ответственных узлов и деталей.

Литература

1. Мужичкий В.Ф. Электромагнитные приборы для обнаружения усталостных трещин в резьбах и зубьях крупного модуля // Докл. X межд. конф. по неразрушающему контролю. – М., 1982. – С.201-207.
2. Левейбег Л.И. Неразрушающий контроль шахтных подземных машин // Дефектоскопия. – 1985. – № 12. – С.66-69.
3. Ознобихин Б.М., Гсишко В.Д. Контроль резьб методом вихревых токов // Тез. докл. V областной научно-технической конференции по неразрушающим методам контроля. – Братск, 1982. – С.54-55.
4. Гонтарь С.С. Опыт применения электромагнитных дефектоскопов типа МД-41К в эксплуатации и ремонте морских судов. ЦБНТИ ММФ // Экспресс-информация. – 1982. – № 4 (473). – С. 2-7.
5. Левенберг Л.И. Образцы контрольные цилиндрические для настройки электромагнитных дефектоскопов // Дефектоскопия. – 1985. – № 8. – С. 83-89.
6. Жученко Н.А. Магнитная диагностика зубчатого колеса тягового редуктора подвижного состава // Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В.Даля. – Луганськ: СНУ ім. Даля, 2004. – № 7 (76). – С. 86-89.

Поступила в редакцию 12.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.А. Колесник, Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск.