

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОЧЕГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС**

© 2017 В.В. Неверов, С.А. Данилин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 11.12.2017

В статье рассмотрен бесконтактный эксплуатационный способ контроля, основанный на обработке СВЧ сигнала, отражённого от контролируемых зубцов колеса. Описано влияние видов износа на характерные информационные параметры износа. Приведена структурная схема экспериментального устройства для контроля рабочего состояния зубчатых колёс. Кратко описана конструкция первичного преобразователя. Отдельно рассмотрен каждый блок экспериментального устройства. Приведены эпюры, поясняющие работу блоков формирования временных интервалов. Описан интерфейс соединения экспериментального устройства с компьютером.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, зубчатое колесо, зондирующий СВЧ поток, экспериментальное устройство.

Зубчатые передачи широко используют в механическом оборудовании для преобразования параметров вращательного движения. Срок их службы определяет показатель безотказности работы механизма, который в свою очередь является одним из критических звеньев дерева отказов. Отказы механического оборудования из-за износа или разрушения зубчатых колёс приводят к длительным простоям и требуют больших затрат для восстановления работоспособности.

В настоящее время диагностика дефектов, износа и целостности зубчатых колёс производится в основном в статическом состоянии. Поэтому проблема диагностики технического состояния зубчатых колёс во время их работы, в эксплуатационном режиме, весьма актуальна [1, 2, 3].

В настоящем экспериментальном устройстве используется бесконтактный радиоволновой метод контроля рабочего состояния зубчатого колеса, основанного на обработке в реальном времени сигналов, полученных после детектирования отражённого от зубцов колеса зондирующего СВЧ излучения [1, 4]. Параметры информационных сигналов сравниваются, соответственно, с эталонными сигналами, полученными в начале эксплуатации зубчатого колеса. Данный метод позволяет получать информацию непосредственно о степени изношенности каждого конкретного зубца и появлении в нем дефектов. Этот метод позволяет проводить анализ состояния зубчатого колеса в динамике. Параметры зондирующего сигнала определяются геометрическими размерами

зубцов и технологической конфигурацией зоны контроля. Излучение СВЧ диапазона может существовать в масляной среде, которая присутствует, например, в редукторных механизмах. К достоинствам данного метода можно отнести отсутствие большого количества датчиков и необходимости их точной юстировки. Так же отсутствует необходимость в частом техническом обслуживании датчика, работающего в достаточно агрессивных условиях.

Выделяются следующие варианты разрушения зубьев: поломка зубьев, выкрашивание зубьев, повреждение торцов зубьев, абразивный износ, появление дефектов в виде трещин, отслаивание или глубинное контактное разрушение материала [5, 6, 7]. В процессе диагностики из преобразованного в электрический сигнал, отражённого зондирующего потока, выделяется несколько информационных параметров. Из всех вышеуказанных видов разрушений с помощью предлагаемого способа нельзя диагностировать только появление трещин в зубцах, если они расположены не на исследуемой поверхности, т.е. глубинное контактное разрушение материала.

Результаты экспериментальных исследований показали, что принятый отражённый сигнал после детектирования имеет форму квази-колоколообразного импульса [1]. Информационные параметры, выделяемые из сигнала, на основании которых происходит оценка степени износа зубчатого колеса с помощью экспериментального устройства, следующие: амплитуда сигнала, нормированные длительности фронтов сигнала, нормированная длительность сигнала, отсутствие сигнала.

Каждый из видов износа оказывает влияние на определённый информационный параметр, выделяемый из отражённого потока. Так отсутствие сигнала указывает на поломку зуба.

*Неверов Владислав Викторович, аспирант.*

*E-mail: vlad.uralsk@gmail.com*

*Данилин Сергей Александрович, аспирант.*

*E-mail: sad1st07@yandex.ru*

Выкрашивание зубьев влияет на следующие информационные параметры:

- амплитуда сигнала;
- нормированная длительность сигнала.

Абразивный износ зубьев предопределяет такие информационные параметры как:

- нормированная длительность сигнала;
- амплитуда сигнала;
- нормированная длительность фронтов сигнала.

Таким образом, каждый из видов износа зубцов контролируемого колеса влияет на несколько измеряемых информационных параметров.

Суть метода измерения заключается в том, что износ зубца изменяет его геометрические параметры, которые в свою очередь влияют на ту или иную информационную часть, отражённого от исследуемого объекта зондирующего СВЧ сигнала, попадающего на приемо-передающий торец волновода. Изменяющиеся в процессе износа геометрические параметры исследуемого объекта влияют также и на форму информационного сигнала, выделяемого из отражённого зондирующего потока, принятого волноводным датчиком [4].

Структурная схема экспериментального устройства для измерения информационных параметров изображена на рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки изображен на рис. 2. Сигнал, отражённый от поверхности зубцов, принимается антенно-фидерным устройством (АФУ), через циркулятор канализируется в амплитудный детектор, протектированный сигнал попадает в активный фильтр, где происходит отделение высокочастотного шума и его усиление. Далее, сигнал попадает на пиковый

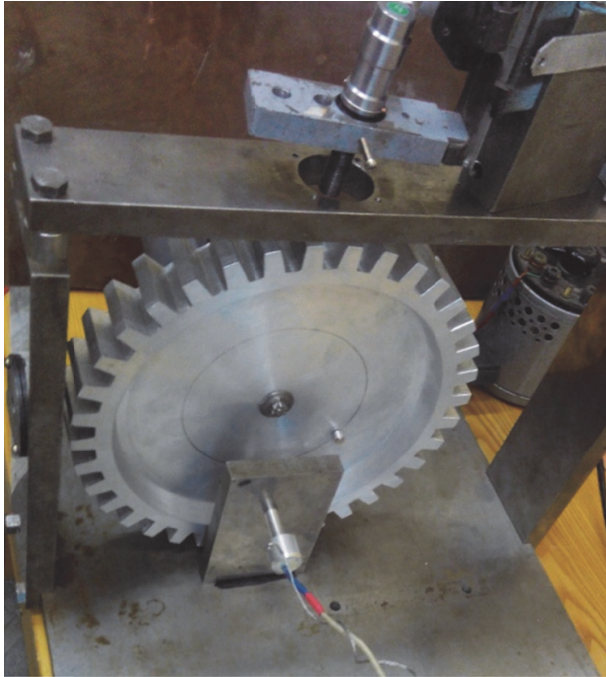
детектор, фиксирующий максимальное значение импульса. С помощью АЦП это значение считывается и запоминается в памяти микроконтроллера (МК). Кроме этого, после фильтрации и усиления информационные сигналы поступают на компараторы 1 и 2, которые выступают в роли формирователей прямоугольных импульсов. Длительности импульсов, а так же длительности фронтов импульсов вычисляются в МК с помощью сформированных импульсов. При прохождении оборотной метки через зону видимости оборотного датчика, в последнем формируется сигнал, который затем поступает на компаратор 3, выступающий так же в роли формирователя прямоугольных импульсов, с помощью этого импульса вычисляется период оборота зубчатого колеса. Период вращения зубчатого колеса необходим для нормировки длительности информационного сигнала и длительностей его фронтов и получения относительных оценок соответствующих временных интервалов. Кроме этого наличие оборотного импульса и его временное положение позволяет идентифицировать каждый зубец контролируемого колеса.

В качестве генератора зондирующего СВЧ сигнала, циркулятора и детектора амплитудно-модулированного сигнала используется разработка Самарского НИИ «Экран», представляющая собой компактное устройство, выполненное по микрополосковой технологии и конструктивно размещённое в одном малогабаритном корпусе. Фотографии СВЧ модулей Самарского НИИ «Экран» представлены на рис. 3.

Антенно-фидерное устройство представляет собой коаксиальную линию передачи, один



Рис. 1. Структурная схема экспериментального устройства



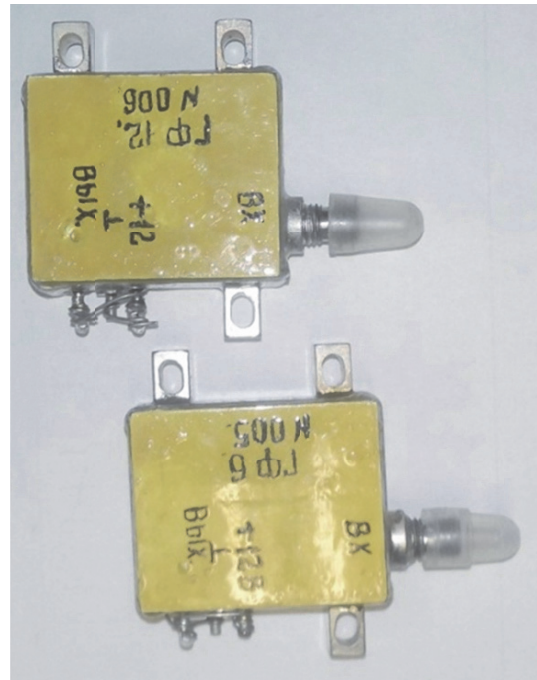
**Рис. 2.** Внешний вид экспериментальной установки

конец которой подключён к генераторному модулю, а второй к модифицированному волноводному излучателю. Модифицированный волноводный излучатель состоит из двух частей: волноводно-коаксиального перехода и волновода с диэлектрическим заполнением, например, в виде кварцевого стекла. Модифицированный волноводный излучатель вворачивается непосредственно в корпус редукторной системы, перпендикулярно зубчатому венцу контролируемого колеса. Применение диэлектрического заполнения позволяет уменьшить габариты волновода при сохранении длины волны, а также избежать попадания брызг масла внутрь волновода и образованию там нагара [8]. Конструкция такого первичного преобразователя изображена на рис. 4.

Сигнал с выхода детектора имеет амплитудное значение порядка 0.2 В. Для эффективного



**Рис. 4.** Конструкция первичного СВЧ преобразователя



**Рис. 3.** СВЧ модули Самарского НИИ «Экран»

использования АЦП необходимо, чтобы уровень сигнала был близок к его источнику опорного напряжения. Опорное напряжение для АЦП равно 2.5 В. Поэтому для усиления сигнала и для фильтрации его от высокочастотных помех в данном экспериментальном устройстве используется активный фильтр Баттерворта третьего порядка, выполненный на двух операционных усилителях [9]. Использование фильтра Баттерворта обусловлено тем, что он обладает максимально гладкой амплитудно-частотной характеристикой в пределах полосы пропускания. В качестве операционных усилителей используются операционные усилители фирмы Analog Devices ADA4062.

Для фиксации максимального значения информационного импульса используется пиковый детектор, выполненный на двух операционных усилителях. Результаты временного анализа схемы пикового детектора в специализированном пакете программ Proteus 8 показали, что при скачкообразном изменении входного сигнала, напряжение выходного сигнала будет отличаться в большую сторону на постоянную величину, равную 0.5 мВ. Для измерения амплитуды каждого импульса необходимо производить сброс выходного напряжения пикового детектора. В этом качестве выступает микросхема-ключ фирмы Analog Devices ADG841. В качестве операционных усилителей так же используются операционные усилители фирмы Analog Devices ADA4062.

Для формирования границ измеряемых временных интервалов используются компараторы. На рис. 5 изображены эпюры, поясняющие

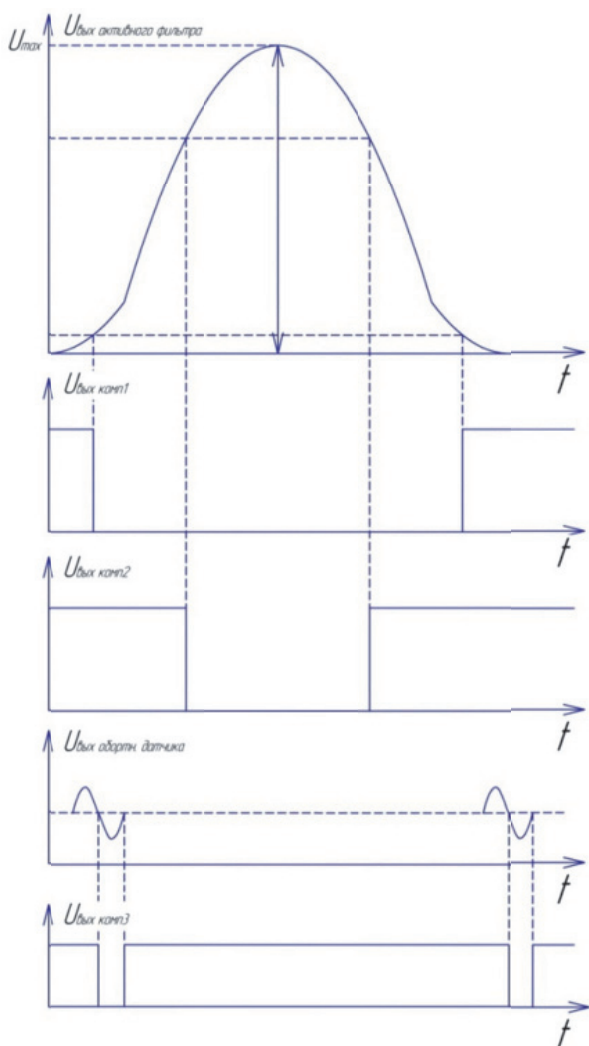


Рис. 5. Эпюры, поясняющие работу блоков формирования временных интервалов

работу блоков формирования временных интервалов. Информационный сигнал, поступающий на вход первого и второго компараторов с выхода активного фильтра, имеет форму, показанную на рисунке 4. Компаратор 1 настроен на срабатывание по уровню 0.1 от амплитуды эталонного информационного сигнала. Компаратор 2 настроен на срабатывание по уровню 0.7 от амплитуды эталонного входного сигнала.

Ядром экспериментального устройства является микроконтроллер (МК), выполняющий функции оцифровки амплитудных значений напряжения информационного сигнала, измерения соответствующих временных интервалов, определения периода вращения зубчатого колеса, нормировки временных интервалов, индикации и передачи измеренных параметров на компьютер. Главными критериями при выборе микроконтроллера для данного устройства являлись:

- наличие встроенных АЦП для оцифровки амплитуды информационного импульса, его разрядность;
- достаточное количество таймеров для

измерения временных интервалов, их разрядность;

- тактовая частота микроконтроллера;
- достаточный объём памяти для хранения эталонных данных и для временного запоминания мгновенных измеренных значений;
- наличие интерфейса UART/USART для связи с компьютером;
- наличие линии для генерации прерывания по внешнему событию, а именно, перепаду логического уровня для мониторинга импульсов с компаратора.

После изучения существующих на сегодняшний день современных МК, выбор был сделан в пользу МК фирмы ST Microelectronics STM32F302C8, т.к. он наиболее полно соответствует предъявляемым критериям выбора. В состав МК входит: ядро ARM Cortex M4 с максимальной поддерживаемой частотой 72МГц; быстродействующий 12-ти разрядный АЦП; 9 таймеров и др. Связь МК с ПК осуществляется по интерфейсу RS-485. В качестве микросхемы интерфейса RS-485 используется микросхема MAX485 фирмы MAXIM с защитой от статического электричества.

Источником первичного питания для экспериментального устройства является сеть переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением  $220 \pm 10\%$  В. Для работы устройства требуются постоянные стабилизированные напряжения  $\pm 12$  В, 5 В и 3,3 В. В целях повышения надежности источника питания, сокращения габаритов устройства, а так же из-за повышенных требований к стабильности выходных напряжений в экспериментальном устройстве используется в качестве блока питания готовое изделие, источник питания КМТ-15 фирмы «ТДК-Лямбда», устанавливаемый на печатную плату. В дальнейшем планируется разработка оригинального импульсного источника питания с необходимыми выходными напряжениями.

Предлагаемое экспериментальное устройство определения рабочего состояния зубчатых колёс энергонагруженных редукторных систем позволяет проводить анализ состояния зубчатых колёс в эксплуатации в любых динамических режимах. В конечном итоге, оно позволяет более точно оценить их текущее рабочее состояние, уменьшить количество препарирований механизма, генерировать сигнал предаварийного состояния редукторной системы и тем самым значительно уменьшить вероятность отказа сложной и ответственной механической системы и обеспечить эксплуатацию зубчатых колёс по их реальному техническому состоянию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин А.И., Неверов В.В. Методы контроля эксплуатационного состояния зубчатых колес редук-

- торных систем // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4(6). С. 1265-1276.
2. Голованов В. В. и др. Методы и средства диагностики авиационных приводов при их эксплуатации по техническому состоянию // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2015. Т. 14. №. 3-1. С. 213-221.
  3. Парфиевич А.Н. Диагностика технического состояния многовальных зубчатых приводов на основе анализа интегральных показателей акустической активности // Journal of Dynamics and Vibroacoustics. 2016. Т. 3. №. 1. С. 20-26.
  4. Данилин А.И., Неверов В.В., Данилин С.А. Способ бесконтактного определения технического состояния зубчатых колес и устройство для его реализации: Пат. 2602488 (РФ). 2016.
  5. Алексеев В.И., Ананьев В.М. Авиационные зубчатые передачи и редукторы. М.: Машиностроение, 1981. С. 238.
  6. Андриенко Л.А., Байков Б.А. Детали машин. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2002. С. 259.
  7. Скойбеда А.Т., Кузьмин А.В., Макейчук Н.Н. Детали машин и основы конструирования. Минск: Высшая школа, 2000. 560 с.
  8. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ //М.: издательство «Высшая школа», 1970.
  9. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Р. Справочник по активным фильтрам. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 128.

## DEVICE FOR EXPERIMENTAL MONITORING THE OPERATING STATE OF COGWHEELS

© 2017 V.V. Neverov, S.A. Danilin

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

Considered the currently applied methods of assessment of operational status of gear wheels, given their shortcomings. Proposed contactless operational control method, based on the processing of microwave signals reflected from controlled teeth of the wheel. Describes the effect of wear of teeth information on the characteristic parameters of the method. The block diagram of the device to control the information parameters, described its main blocks.

*Keywords:* contactless control, cogwheels, microwave signal, diagnostics operating state, experimental device.