

УДК 531.7.08

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ОСНОВНЫХ АСПЕКТОВ БЕСКОНТАКТНОГО РАДИОВОЛНОВОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

© 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 кратко описывается бесконтактный радиоволновой способ контроля технического состояния зубчатых колес. Описаны некоторые особенности использования первичных преобразователей с разными типами используемых волн. Проанализированы экспериментально полученные зависимости амплитуды информационного сигнала от расстояния между торцом первичного преобразователя и контролируемой поверхностью. Приведены осциллограммы информационных сигналов, полученные при отработке датчиковой аппаратуры на лабораторном стенде. Предложены подходы к определению критериев выбора рабочего участка амплитудной характеристики, позволяющие определять предпочтительный зазор при установке первичных преобразователей в корпусе исследуемого зубчатого механизма.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, амплитудная характеристика, метод наименьших квадратов, аппроксимирующий полином, зондирующий СВЧ поток, экспериментальное устройство.

Зубчатые передачи — наиболее распространенный тип передач в современном машиностроении и приборостроении. Их применяют для передачи мощностей от долей до десятков тысяч киловатт [1]. Безотказность зубчатых передач — определяющий фактор надёжности работы механического оборудования. Для того чтобы зубчатые передачи длительное время работали безотказно, необходимо своевременно определять вид возникающих нарушений и причины их появления, то есть классифицировать повреждения, связав с причиной, которая их вызвала. В этом немаловажную роль играет своевременный контроль технического состояния зубчатых колес, входящих в состав зубчатой передачи.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили методы для диагностики и контроля износа и целостности зубчатых колес применяемые в основном в статическом состоянии. Существующие же методы контроля зубчатых колес в динамике [2, 3] обладают рядом недостатков, которые устраняются в разрабатываемом бесконтактном способе контроля. Разрабатываемый способ основан на обработке отраженного от исследуемой поверхности зондирующего СВЧ потока, которая заключается в сравнении параметров сигнала, получаемого в реальном времени с эталонным сигналом, полученным в начале эксплуатации зубчатого колеса [4].

Суть способа определения состояния зубчатого колеса заключается в том, что износ зубца изменяет его геометрические параметры, кото-

рые в свою очередь влияют на, отражённый от исследуемого объекта зондирующий СВЧ сигнал, часть которого попадет на приемопередающий 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 [5].

Целью данной работы является экспериментальная проверка основных операций бесконтактного радиоволнового способа определения технического состояния зубчатых колес. Для реализации поставленной цели используется специально разработанная экспериментальная установка, в которой для получения зондирующего излучения СВЧ диапазона используется генераторы с частотами 12 ГГц и 32 ГГц. Возбужденные электромагнитные колебания СВЧ диапазона канализируются с помощью циркулятора в тракт первичного преобразователя, выполненного в виде круглого волновода, торец которого является излучателем зондирующего потока. В волноводном преобразователе для генератора на 12 ГГц возбуждается волна  $H_{11}$  типа, а первичном преобразователе для генератора на 32 ГГц возбуждается волна типа  $E_{01}$ , структуры полей волн типа  $H_{11}$  и  $E_{01}$  изображены на рис. 1. Применение волны типа  $E_{01}$  целесообразно из-за её отличительного свойства, заключающегося в полной круговой симметрии поля [6, 7]. Это позволяет избежать проведения дополнительных операций при настройке первичных преобразователей по взаимной ориентации силовых линий поля  $E$  и зубца шестерни для получения максимальной амплитуды информационного сигнала. Внутри круглый волновод заполняется

Неверов Владислав Викторович, аспирант.

E-mail: vlad.uralsk@gmail.com

Данилин Сергей Александрович, аспирант.

E-mail: sad1st07@yandex.ru

кварцевым стеклом, что позволяет уменьшить габариты волновода, а так же предотвратить засорение его внутреннего объёма. Выбор круглого волновода в качестве основы для фидерного тракта СВЧ первичного преобразователя обусловлен еще и тем, что датчики цилиндрической формы с позиции эксплуатации проще в установке, креплении и юстировке.

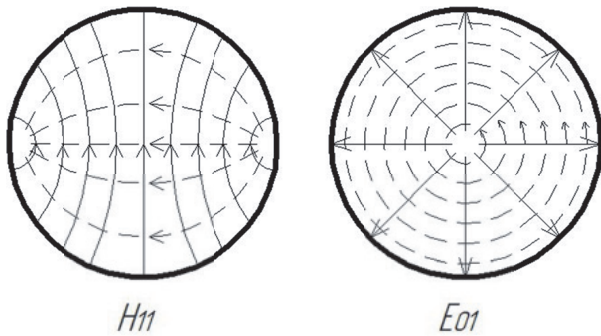


Рис. 1. Структуры полей волн типа  $E_{01}$  и  $H_{11}$  в круглом волноводе

Для экспериментальных исследований были разработаны и изготовлены образцовые шестерни с заранее заданной геометрией зубца. При проведении экспериментов установлено, что на форму информационного сигнала и его амплитуду сильное влияние оказывает величина зазора между приемо-передающим торцом волновода и контролируемым объектом.

На рис. 2 и 3 представлены осциллограммы протектированного высокочастотного сигнала (огibaющей) при разных величинах зазоров между торцом волноводного излучателя и контролируемой поверхностью. В данном случае рассматривался зондирующий электромагнитный поток СВЧ диапазона частотой 12 ГГц. Масштаб по оси абсцисс для графиков, изображенных на рис. 2 и 3, составляет 2 мс/деление, масштаб по оси ординат составляет 500 мВ/деление.

Чтобы изучить причину трансформации формы протектированной огibaющей высокочастотного сигнала, были построены графиче-

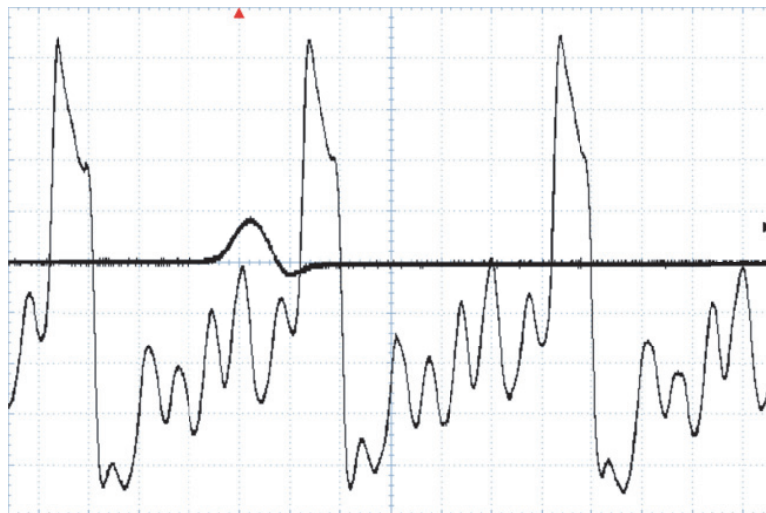


Рис. 2. Информационный сигнал и сигнал оборотной метки при величине зазора между первичным преобразователем и контролируемым объектом 2,5 мм

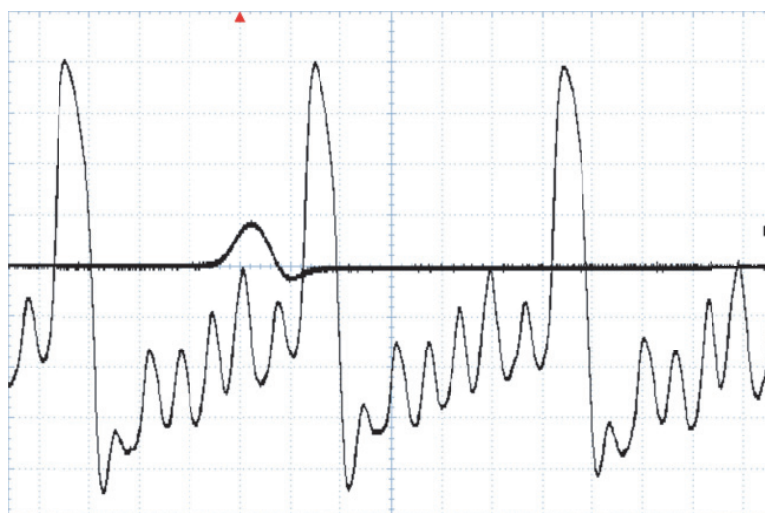


Рис. 3. Информационный сигнал и сигнал оборотной метки при величине зазора между первичным преобразователем и контролируемым объектом 3,5 мм

ки зависимости амплитуды сигнала от расстояния между торцом излучающего волновода и контролируемой поверхностью. Амплитудная характеристика для первичного преобразователя, излучающего электромагнитный СВЧ поток на частоте 12 ГГц, изображена на рис. 4. А на рисунке 5 изображена амплитудная характеристика для первичного преобразователя, излучающего электромагнитный поток на частоте 32 ГГц. Амплитудные характеристики для волноводных преобразователей, работающих на частотах 6 ГГц и для 13 ГГц, представлены в источнике [7]. Приведенная на графике амплитудная характеристика нормирована к амплитудному значению сигнала. Форма представленных в источнике [7] амплитудных характеристик отличается от представленных на рис. 4 и 5, данные отличия объясняются различием поверхностей отражения зондирующего СВЧ потока. При получении амплитудных характеристик в источнике [7] поверхностью отражения служила плоскость, в то время как для амплитудных характеристик, представленных в данной статье, поверхностью отражения служил трапециевидный параллелепипед. Исходя из этого, можно отметить, что фазовые набег, возникающие при изменении расстояния между приемником и отражающей поверхностью, будут влиять на интенсивность отраженного электромагнитного потока, попадающего на торец первичного преобразователя.

Анализируя полученные зависимости можно также отметить, что на форму сигнала влияет нелинейность амплитудной характеристики, т.к. при вращении зубчатого колеса расстояние между контролируемой поверхностью и торцом первичного преобразователя не будет постоянным. Особенно ярко это будет проявляться в местах локальных минимумов амплитудных характеристик, первый из которых приходится на

0,25 от длины волны зондирующего потока СВЧ диапазона.

Диапазон рабочих зазоров между контролируемой поверхностью и торцом волноводного первичного преобразователя выбирается по амплитудной характеристике, изображенной на рис. 4 и 5.

Опираясь на приведенный выше материал, можно сформулировать критерии выбора рабочего участка амплитудной характеристики по степени ее нелинейности, однозначности проводимых измерений и максимизации амплитуды выходного сигнала.

С точки зрения увеличения амплитуды информационных сигналов необходимо рекомендовать зазоры, не превышающие четверть длины волны зондирующего излучения.

Для обеспечения однозначного соответствия между значением сигнала и рабочим зазором необходимо исключить диапазоны изменений зазоров, соответствующих экстремальным значениям амплитудной характеристики (рис. 4, 5).

Нелинейные свойства различных участков амплитудной характеристики удобно рассматривать по их отклонению, например, от линейной функции или оценивать степень корреляции с линейной функцией [9]. Для этого необходимо выполнить аппроксимацию амплитудной характеристики преобразователя некоторым степенным полиномом, а качество аппроксимации оценивать коэффициентом детерминации ( $R^2$ ) [10].

Далее, был проведен анализ участков амплитудной характеристики в диапазоне нормированных длин волн  $0 < \lambda \leq 0,25$  и  $0,25 \leq \lambda \leq 0,5$  зондирующего СВЧ потока для первичных преобразователей, работающих на частоте 12 ГГц и 32 ГГц. На участке  $0 < \lambda \leq 0,25$  зондирующего СВЧ потока с частотой 12 ГГц экспериментальная зависимость аппроксимирована методом наи-

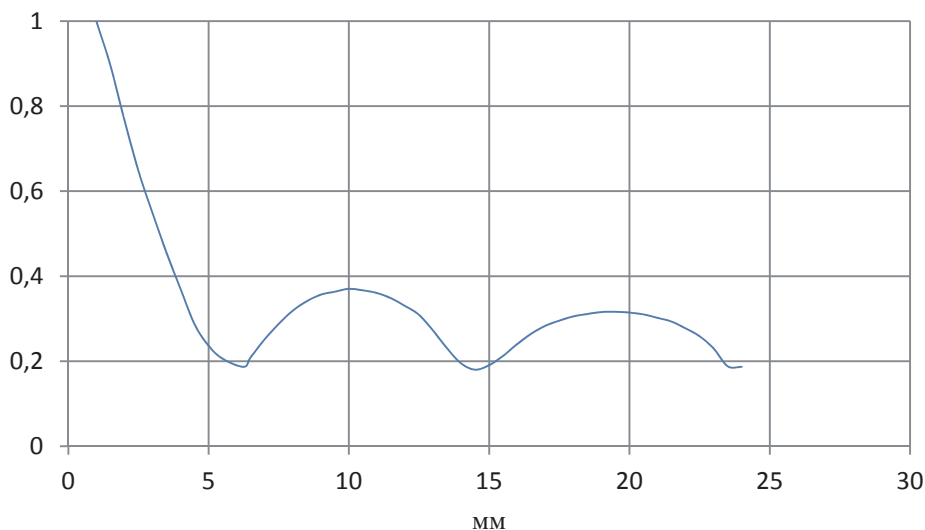


Рис. 4. Амплитудная характеристика для первичного преобразователя на 12 ГГц

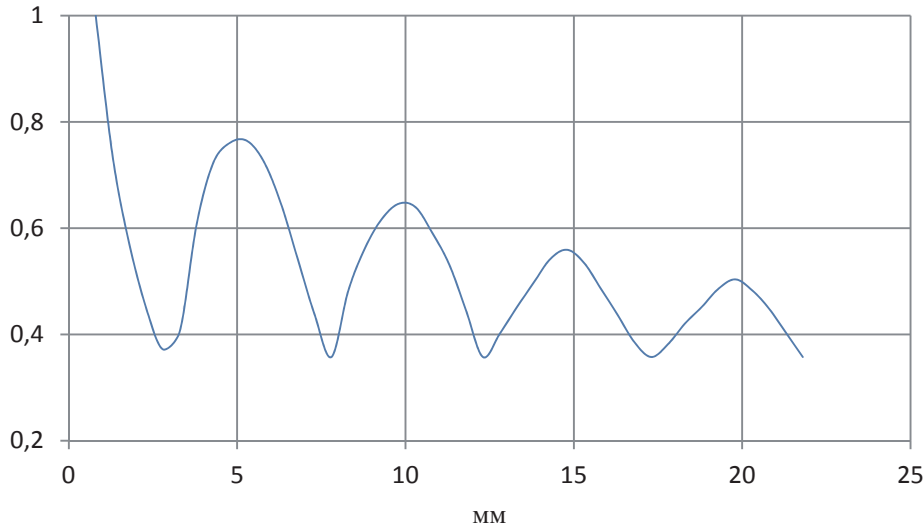


Рис. 5. Амплитудная характеристика для первичного преобразователя на 32 ГГц

меньших квадратов [11]. В результате получен аппроксимирующий полином третьей степени, представленный следующим выражением.

$$y = 0,0033x^3 - 0,0118x^2 - 0,2238x + 1,2368. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) при этом равен 0,9997. Далее производилось вычисление степени корреляции аппроксимирующего полинома с линейной функцией, результат которого равен 0,98. Экспериментальные данные, аппроксимирующая функция и линейная функция для данного участка изображены на рис. 6.

Аналогично производится анализ второго участка на участке  $0,25 \leq \lambda \leq 0,5$ . Аппроксимирующий полином представлен выражением (2), полученным так же с помощью метода наименьших квадратов.

$$y = -0,0006x^3 + 0,0025x^2 - 0,1383x + 0,6188. \quad (2)$$

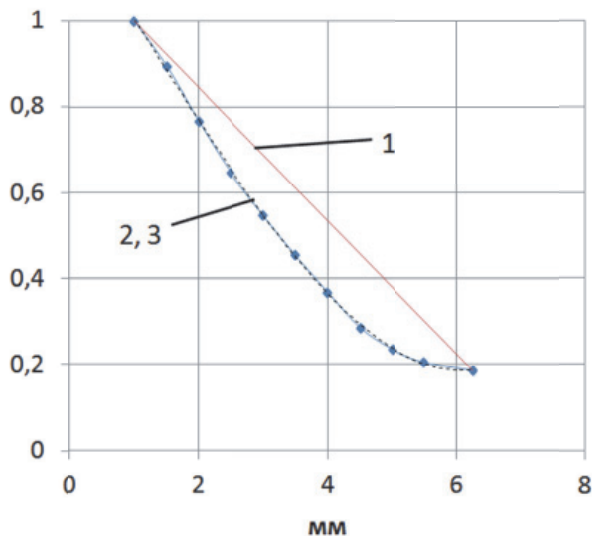


Рис. 6. Участок амплитудной характеристики первичного преобразователя для 12 ГГц на участке  $0 < \lambda \leq 0,25$ :

1 – линейная функция; 2 – экспериментальная зависимость; 3 – аппроксимирующая функция

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) при этом равен 0,9976. Степень корреляции аппроксимирующей функции с линейной функцией, проходящей через точки максимума и минимума на данном участке равна 0,97. Экспериментальные данные, аппроксимирующая функция и линейная функция для данного участка изображены на рис. 7.

Далее проводится анализ участка амплитудной характеристики в диапазоне нормированных длин волн  $0 < \lambda \leq 0,25$  для зондирующего потока частотой 32 ГГц. Полином, полученный с помощью метода наименьших квадратов имеет вид:

$$y = -0,0248x^3 + 0,2579x^2 - 0,9764x + 1,6279. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) при этом равен 0,9998. Степень корреляции аппроксимирующей функции с линейной функцией, проходящей через точки максимума и минимума на

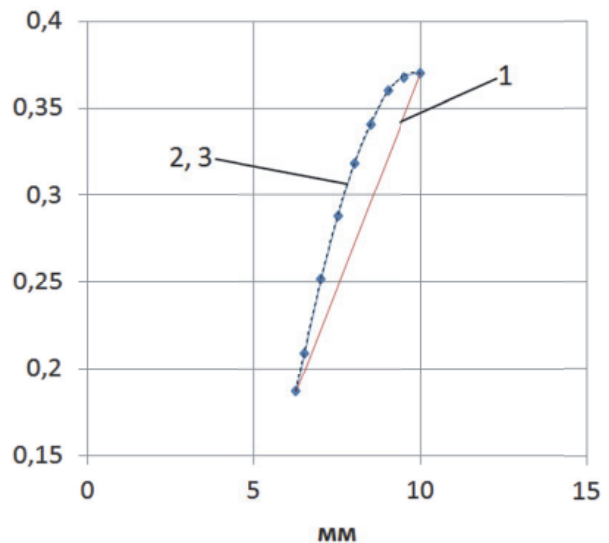
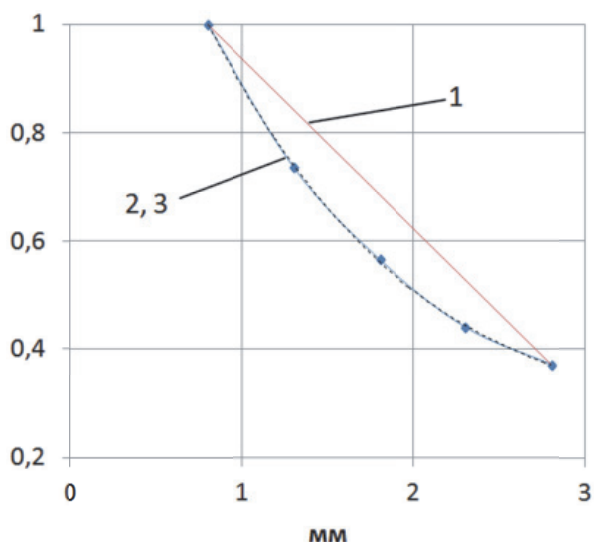


Рис. 7. Участок амплитудной характеристики первичного преобразователя для 12 ГГц на участке  $0,25 \leq \lambda \leq 0,5$ :

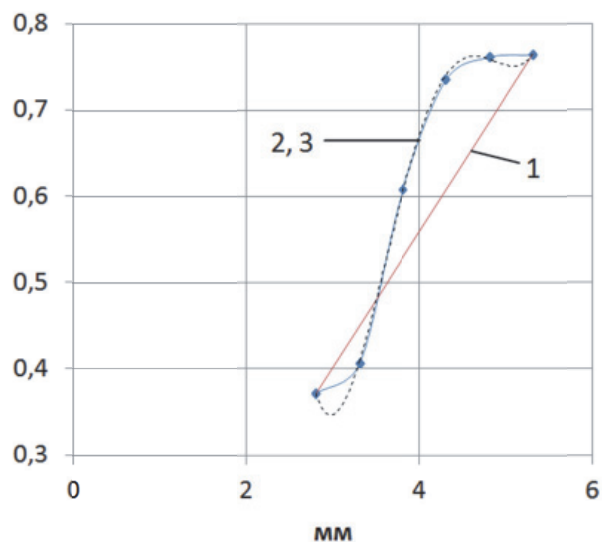
1 – линейная функция; 2 – экспериментальная зависимость; 3 – аппроксимирующая функция





**Рис. 8.** Участок амплитудной характеристики первичного преобразователя для 32 ГГц на участке  $0 < \lambda \leq 0,25$ :

1 – линейная функция; 2 – экспериментальная зависимость; 3 – аппроксимирующая функция



**Рис. 9.** Участок амплитудной характеристики первичного преобразователя для 32 ГГц на участке  $0,25 \leq \lambda \leq 0,5$ :

1 – линейная функция; 2 – экспериментальная зависимость; 3 – аппроксимирующая функция

данном участке равна 0,99. Экспериментальные данные, аппроксимирующая функция и линейная функция для данного участка изображены на рис. 8.

Аналогично производится анализ второго участка амплитудной характеристики на участке длин волн  $0,25 \leq \lambda \leq 0,5$  для зондирующего потока частотой 32 ГГц. Аппроксимирующий полином, полученный так же с помощью метода наименьших квадратов имеет вид:

$$y = 0,106x^4 - 1,7941x^3 + 11,12x^2 - 29,695x + 29,198. \quad (4)$$

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) при этом равен 0,9997. Степень корреляции аппроксимирующей функции с линейной функцией, проходящей через точки максимума и минимума на данном участке равна 0,92. Экспериментальные данные, аппроксимирующая функция и линейная функция для данного участка изображены на рис. 9.

На основании проведенного анализа можно заключить что изменение амплитудной характеристики на участках  $0 < \lambda \leq 0,25$  в большей мере соответствует линейному закону, кроме этого на данных участках амплитудные характеристики обладают максимальной крутизной преобразования. Исходя из этого можно сказать, что на данном участке изменение амплитуды сигнала в зависимости от расстояния между торцом первичного преобразователя и контролируемой поверхностью в меньшей степени будет влиять на искажение формы протектированной огибающей, суть информационного сигнала. Поэтому зазор предпочтительнее всего выбирать из на этих участках, но не в окрестностях локального минимума, приходящегося на 0,25 длины

волны. Наиболее подходящим вариантом будет середина участка  $0 < \lambda \leq 0,25$ , т.к. там сохраняется постоянная разность между линейной функцией и функцией аппроксимирующей полученную экспериментальным путем амплитудную характеристику.

Так же при использовании данных участков амплитудных характеристик в полной мере используются возможности первичных преобразователей, позволяющие получать максимальные значения выходного сигнала без дополнительного его усиления непосредственно переходя к его обработке и анализу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скойбеда А.Т., Кузьмин А.В., Макейчук Н.Н. Детали машин и основы конструирования //Макейчук–Минск: Высшая школа, 2000. 560 с.
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. Сидоров В.А. Повреждения зубчатых передач: классификация // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и ин-

- струмент для профессионалов, серия Металлообработка. – 2010. – №. 3. – С. 28-34.
6. Данилин А.И., Неверов В.В. Оценка граничных возможностей применения бесконтактного способа определения технического состояния зубчатых колес // «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций»: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Самара: Из-во «Офорт», 2016. с. 172.
  7. Данилин А.И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2008.
  8. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970.
  9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов. М: Высшая школа, 2004. 479 с.
  10. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М: издательство ЮНИТИ, 2001. 656 с.
  11. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории наблюдений //М: гос. издательство физ.-мат. литературы, 1958. 349 с.

## EXPERIMENTAL INSPECTION OF THE CONTACTLESS RADIOWAVE METHOD FOR DETERMINING THE TECHNICAL CONDITION OF GEAR WHEELS

© 2017 V.V. Neverov, S.A. Danilin

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

The article describes contactless radiowave method for monitoring the technical condition of gears. Shows the image of the experimental device. Some features of the use of primary transducers with different types of waves excited inside them are described. The experimentally obtained dependences of the amplitude on the distance between the end face of the primary transducer and the monitored surface are analyzed. On the basis of the analysis, conclusions were drawn as to which gap is preferable to use when installing the primary converter.

*Keywords:* non-destructive testing, amplitude characteristic, least squares method, approximating polynomial, microwave probe flow, experimental device.