

**МИЛЮШИН НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**ФАЗОГЕНЕРАТОРНЫЙ ДАТЧИК КОНТРОЛЯ  
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕКТОВ  
(НА ПРИМЕРЕ ТУРБОМАШИН)**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел 2013 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Подмастерьев Константин Валентинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
Иванов Борис Рудольфович,  
Академия ФСО России,  
профессор кафедры № 7

кандидат технических наук  
Дорофеев Николай Викторович,  
заведующий кафедрой “Управление и контроль  
в технических системах”,  
МИ (филиал) ФГБОУ ВПО ВлГУ

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский государственный  
университет приборостроения и информатики»

Защита состоится “26” февраля 2013 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» по адресу: 302020, Россия, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, (ауд. 212).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Автореферат разослан 22 января 2013 г. и размещен в сети Интернет Министерством образования и науки Российской Федерации.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

\_\_\_\_\_ В. Н. Волков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Существует класс высокоскоростных электропроводящих объектов (ВЭПО), элементы которых в процессе функционирования перемещаются по трассе с большими линейными скоростями (от 300 до 2000 м/с и более). Объекты могут быть как сплошными, так и составными, монолитными или оболоченными; состоять из ферро- и диамагнитных металлов и сплавов либо их сочетания; перемещаться поодиночке, группами либо потоками. Расстояние между движущимися элементами ВЭПО в направлении трассирования может быть одного порядка с линейными размерами самих элементов и иметь значение в несколько десятков миллиметров и менее. В процессе трассового движения элементы либо часть элементов в кластере могут совершать рыскание по трассе, участвуя при этом ещё и в колебательном движении вокруг одной или нескольких мгновенных осей вращения. Материал объекта во время рыскания может испытывать значительные динамические напряжения и механические деформации, сравнимые с пределами прочности или превышающими их. В последнем случае практически неизбежно возникают аварийные отказы объектов из-за неуправляемого выделения значительной кинетической энергии, приводящие к катастрофическим последствиям с риском для жизни и здоровья обслуживающего персонала и значительным экономическим ущербом.

Примерами подобных объектов являются орудия боевых комплексов, газотурбинные двигатели подвижного и стационарного назначения, агрегаты газотранспортных станций, паросиловые энергетические турбоустановки и т.п., техническое состояние которых во многом определяется, например, начальной скоростью снаряда или характером перемещения лопаток лопаточных венцов.

Обязательным условием обеспечения эффективности и безопасности эксплуатации подобных объектов является объективный контроль параметров движения или взаимного расположения их подвижных элементов. Указанные объекты объединяют близкие значения динамических параметров движения их элементов. Поэтому, несмотря на определенную специфику контроля различных объектов, создаются условия рассмотрения решения общих задач по их контролю на примере одного из объектов, в качестве которого в работе выбраны турбомшины.

Одним из наиболее эффективных методов контроля параметров перемещения или взаимного расположения элементов объектов, в частности, колебаний рабочих лопаток лопаточных венцов в настоящее время является бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), в соответствии с которым контролируемые параметры определяются математической обработкой измеренных временных интервалов прохождения торцом лопатки нескольких неподвижных контрольных точек за некоторое число оборотов ротора турбомшины.

Высокая чувствительность ДФМ к погрешности определения границ временных интервалов с учетом динамики контролируемых высокоскоростных объектов предполагает, однако, жесткие требования к метрологическим характеристикам используемых датчиков, важнейшими из которых являются: частота переключения (не менее 200 кГц); время задержки срабатывания (не более  $0,25 \cdot 10^{-6}$  с); номинальное расстояние срабатывания (не менее 3 мм); гистерезис (не более 5 %). При этом для обеспечения универсальности датчика с учетом необходимости контроля различных объектов, работающих при различных условиях, характеристики датчика должны быть максимально инвариантными к материалам контролируемых объектов

(турбинные стали, нержавеющие стали, титановые сплавы, алюминиевые сплавы, медь и медные сплавы).

Анализ состояния вопроса показал, что применяемые в настоящее время импульсные индукционные и емкостные датчики обладают существенными погрешностями, зависящими от параметров движения и материала объекта, и по значению, порой, соизмеримыми с контролируруемыми параметрами. Кроме того, тенденция к увеличению мощности силовых турбомашин ведет к применению лопаток увеличенной длины из диамагнитных титановых сплавов, для контроля которых применение описанных датчиков затруднительно либо принципиально невозможно.

Таким образом, возникает необходимость в разработке импульсного датчика, удовлетворяющего высоким точностным и динамическим требованиям.

В рамках поиска наиболее приемлемого принципа построения преобразователя для датчика с учетом выдвинутых требований установлено, что таковым является фазогенераторный преобразователь (ФГП), основанный на явлении взаимной синхронизации двух генераторов через элементы связи (с комплексным, резистивным, взаимоиндуктивным, комбинированным, резонансным и т.п. характером проводимости). ФГП обеспечивает фазовое преобразование выходных параметров первичного параметрического вихретокового преобразователя (ВТП), в качестве которого применяется катушка индуктивности. Благодаря высокой чувствительности, высокому уровню выходного сигнала и его фазовой модуляции ФГП обладают высокой помехозащищенностью и возможностью реализации принципа самосравнения.

Исследованиям ФГП посвящены работы следующих ученых: ФГП с резистивной связью – работы К.С. Полуляха, Е.Н. Гончарова, Ю.Г. Клетцнера; анализу стационарного режима ФГП со слабой связью и чувствительности ФГП с сильной связью – работы В.В. Володарского; развитию теории комбинационного поличастотного ФГП – работы В.В. Иванова, В.К. Шакурского и С.В. Шлыкова; исследованию ФГП с положительной обратной связью – работы В.В. Рапина.

Несмотря на указанные выше достоинства ФГП известные технические решения на их основе не могут быть применены для контроля высокоскоростных электропроводящих объектов, поскольку обладают низкими динамическими характеристиками. Потому исследование и разработка фазогенераторного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов является *актуальной задачей*.

**Объектом исследования** является контроль высокоскоростных электропроводящих объектов, техническое состояние которых характеризуется параметрами перемещения или взаимного расположения отдельных элементов (на примере контроля колебаний лопаток турбомашин бесконтактным дискретно-фазовым методом).

**Предмет исследования** – принцип построения, математические модели и метрологические характеристики индуктивного фазогенераторного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов.

**Целью диссертационной работы** является повышение достоверности контроля высокоскоростных электропроводящих объектов за счет разработки индуктивного фазогенераторного датчика с улучшенными метрологическими характеристиками.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

- разработка принципа построения быстродействующего фазогенераторного датчика;
- разработка математической модели ФГП с учетом свойств электропроводящего объекта;

- синтез структурной и принципиальной схем датчика;
- теоретические исследования основных метрологических характеристик;
- разработка научно обоснованных рекомендаций по назначению конструктивно-технологических параметров;
- разработка электронного метода метрологического определения динамических характеристик ФГП;
- экспериментальные исследования с целью подтверждения достоверности основных теоретических положений, заложенных в основу принципа построения датчика, работоспособности датчика и достижения улучшенных метрологических характеристик;
- разработка предложений по использованию предложенного датчика в устройствах и системах контроля высокоскоростных электропроводящих объектов (на примере турбомашин).

**Методы исследования.** В работе использованы методы анализа эквивалентных электрических схем, анализа взаимодействия электромагнитного поля катушки индуктивности генератора и проводящей среды, анализа переходных характеристик, теория воздушного трансформатора, методы математической логики, статистической обработки результатов эксперимента.

#### **Научная новизна**

1. Разработан принцип построения фазогенераторного быстродействующего датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов на основе непрерывной системы пар последовательно возбуждаемых прямоугольными импульсами переходных характеристик параллельного колебательного контура.
2. Разработана математическая модель фазогенераторного преобразователя, учитывающая электрофизические свойства объекта контроля, параметры параллельного колебательного контура и параметры сигнала возбуждения.
3. Теоретически установлены зависимости основных метрологических характеристик фазогенераторного быстродействующего датчика от конструктивных параметров датчика и характеристик контролируемого объекта.
4. Разработан электронный метод исследования динамических характеристик быстродействующих ФГП – метод коммутируемого плоского контура, и теоретически обоснована его метрологическая сопоставимость с методом механических перемещений тестовых пластин.

#### **Практическая ценность**

1. Разработана структурная и принципиальная схемы фазогенераторного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов.
2. Разработаны научно обоснованные рекомендации по назначению конструктивно-технологических параметров фазогенераторного датчика.
3. Разработана специализированная микросхема активной части ФГП.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- принцип построения и математическая модель фазогенераторного преобразователя на основе непрерывной системы пар последовательно возбуждаемых прямоугольными импульсами переходных характеристик параллельного колебательного контура;
- структурная, принципиальная схемы и научно обоснованные рекомендации по назначению конструктивно-технологических параметров фазогенераторного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов;

– электронный метод коммутируемого плоского контура исследования динамических характеристик быстродействующих фазогенераторных датчиков.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались на V международной научно-практической конференции «Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания» (г. Новосибирск, 2011г.); международной научно-технической интернет-конференции «Информационные системы и технологии» (г. Орел, 2011 г.); международной научно-технической конференции «Динамика современной науки» (г. София, Болгария, 2011 г.); XX Международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (г. Алушта, Украина, 2011 г.), а также на ежегодных научно-технических конференциях в ОрелГТУ и в Госуниверситете-УНПК (г. Орел, 2009-2011 г.).

Результаты диссертационной работы апробированы и приняты к внедрению на ОАО «Калужский двигатель», внедрены в Госуниверситете – УНПК в учебный процесс при подготовке специалистов, бакалавров и магистров по направлению «Приборостроение».

### **Публикации**

По результатам выполненных исследований опубликовано 18 работ, включая 6 научных статей (5 в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК); 4 доклада на конференциях, 4 патента на изобретение и 3 патента на полезную модель.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав с выводами, заключения, списка используемых источников (131 наименование). Изложена на 146 страницах, включая 53 рисунка, 13 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, определена цель, поставлены задачи исследования, приведены научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится обоснование необходимости разработки датчика контроля ВЭПО и на примере контроля лопаточных венцов турбомашин дано обоснование требований к датчику, производится обзор и анализ существующих решений, обосновывается выбор наиболее рационального принципа построения датчика.

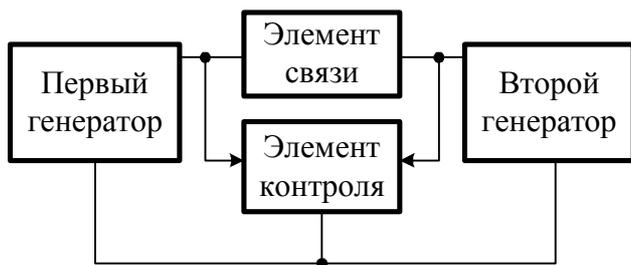
Наиболее эффективным методом контроля параметров колебаний рабочих лопаток лопаточных венцов в настоящее время признан бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), по которому параметры колебаний определяются математической обработкой измеренных временных интервалов прохождения торцом лопатки нескольких неподвижных контрольных точек (периферийных датчиков) относительно корневого датчика за некоторое число оборотов ротора турбомашин.

Высокая чувствительность ДФМ к погрешности определения границ временных интервалов предполагает жесткие требования к метрологическим характеристикам используемых датчиков. Анализ состояния вопроса показал, что применяемые в настоящее время импульсные индукционные и емкостные датчики обладают существенными погрешностями, зависящими во многом от параметров движения лопаток. К числу причин погрешностей относятся: искажение симметрии формы выходного сигнала из-за не идеальности изготовления и несимметричности условий взаимодействия датчика и торца лопатки; запаздывание сигнала из-за инерционно-

сти процессов в датчике, вихревых потерь и влияния паразитных емкостей; существенное влияние высокочастотной аддитивной помехи, наводимой внешними источниками в сигнальной линии датчика, и т.п. В итоге погрешность в отдельных случаях может быть соизмеримой со значениями контролируемых параметров колебаний. Кроме того, тенденция к увеличению мощности силовых турбомашин ведет к применению рабочих лопаток увеличенной длины, изготовленных из диамагнитных титановых сплавов, для контроля которых применение описанных выше импульсных датчиков становится весьма затруднительным либо принципиально невозможным.

Это обуславливает необходимость исследования путей создания импульсного датчика, удовлетворяющего жестким требованиям дискретно-фазового метода, к числу которых относятся: частота переключения – не менее 200 кГц; время задержки срабатывания – не более 0,25 мкс; номинальное расстояние срабатывания – не менее 3 мм; материалы объекта контроля – турбинные и нержавеющей стали, титановые, алюминиевые и медные сплавы.

Наиболее приемлемым типом датчиков для контроля ВЭПО представляются датчики на базе ФГП, классический принцип построения которых (рисунок 1) основан на явлении взаимной синхронизации двух генераторов через элемент связи с разным характером проводимости - комплексным, резистивным, взаимоиндуктивным, комбинированным, резонансным и т.п. ФГП обеспечивает фазовое преобразование выходных параметров первичного параметрического ВТП (катушки индуктивности). ФГП характеризуются высокой чувствительностью. Известны другие варианты ФГП, анализ которых позволил осуществить классификацию ФГП по принципу формирования разности фаз. Наряду с преобразователем прямого действия (фазовый сдвиг формируется сигналами двух связанных генераторов), существуют мультипликативные преобразователи (фазовый сдвиг формируется многократным умножением первичного сдвига) и комбинационные (фазовый сдвиг формируется



**Рисунок 1 - Структурная схема классического варианта**

многократным суммированием основной и вспомогательной частот).

Анализ работ предшественников показывает, что для реализации потенциально высокой чувствительности классического варианта ФГП требуется применение стабилизирующей обратной связи, например по амплитуде на колебательном контуре, которая содержит инерционное звено в виде  $RC$  – фильтра. Мультипликативный

вариант ФГП представляет собой  $LC$  – автогенератор, охваченный положительной обратной связью по фазе – длительность переходного процесса в нем существенно превышает длительность периода колебаний автогенератора. В комбинационном варианте ФГП разность фаз формируется в процессе преобразования информационного сигнала автогенератора посредством как минимум одного полосного усилителя с инверсной фазовой характеристикой и последующими неоднократными операциями суммирования/вычитания исходного и полученного преобразованиями сигналов. Его переходная динамическая характеристика подобна переходной характеристике инерционного звена первого порядка.

Таким образом, непосредственное применение известных решений ФГП для целей контроля функционирования ВЭПО не представляется возможным – они не обладают необходимыми динамическими характеристиками.

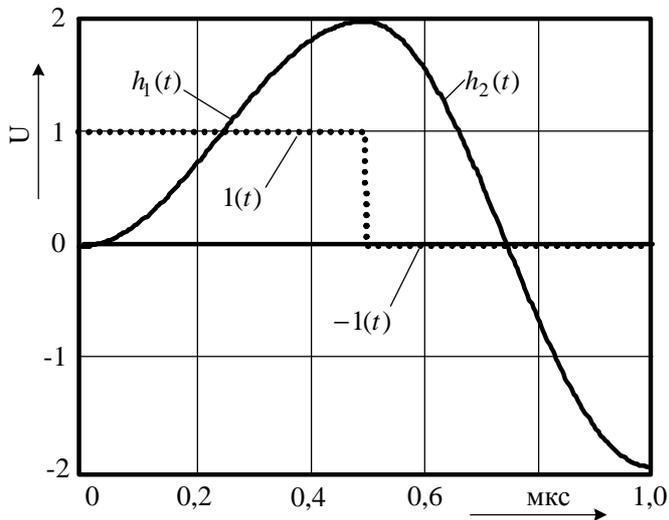
**Вторая глава** посвящена разработке принципа построения фазогенераторного быстродействующего датчика контроля ВЭПО, разработкам его математической модели, структурной и принципиальной схем.

Анализом известных решений ФГП установлено, что применение цепей стабилизации амплитуды колебаний на колебательных контурах, обратных связей по информационному параметру снижает динамические параметры. Для быстродействующего датчика необходимо использовать принцип построения, который бы не предполагал их применение. Установлено, что физическим явлением, удовлетворяющим желательному принципу построения, является отклик (переходная характеристика)  $h(t)$  параллельного колебательного контура (ПКК) на сопряженную пару единичных функций:  $1(t)$  и  $-1(t)$  (функций Хевисайда) (рисунок 2). Воздействие ВЭПО на ПКК осуществляется посредством внесения в него комплексного сопротивления  $Z_{вн} = R_{вн} + j\omega L_{вн}$ , где  $R_{вн}$  и  $\omega L_{вн}$  – активная и индуктивная составляющие внесенного сопротивления;  $\omega$  – круговая частота собственных колебаний ПКК. Тогда  $h(t) = 1 - \exp[-(R + R_{вн})t/2L] \cos \omega t$ , и при увеличении сопротивления потерь увеличится затухание переходного процесса.

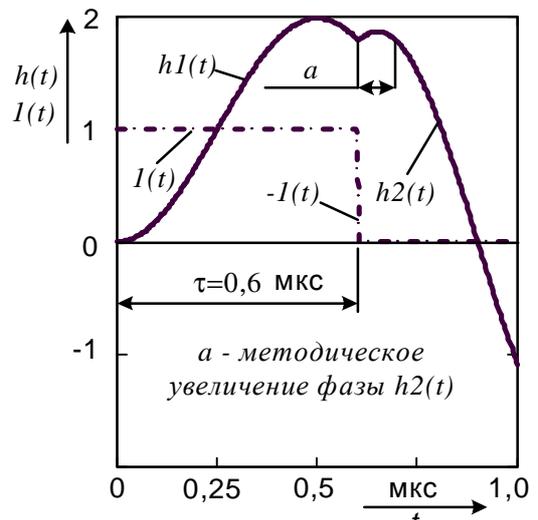
Проведенными соискателем предварительными экспериментами установлено, что изменения параметров переходной характеристики  $h(t)$  ПКК уверенно обнаруживается путем амплитудного компарирования с заданным постоянным уровнем ее ниспадающей ветви. С учетом этого разработан принцип построения быстродействующего фазогенераторного преобразователя, заключающийся в формировании непрерывной системы пар переходных характеристик ПКК, возбуждаемых чередующимися воздействиями пар разно-полярных функций Хевисайда, последующем преобразовании откликов ПКК в импульсное напряжение и контроле изменения разности фаз между фронтами импульсов.

Исследованиями предложенного принципа установлено, что при некоторых значениях задержки  $t$  функций Хевисайда в паре может появляться методическое увеличение фазы отклика (рисунок 3), которое обусловлено явлением самоиндукции при прерывании тока в индуктивности ПКК. На рисунке 4 представлена теоретическая диаграмма изменения фазы отклика при изменении  $t$ . Установлено, что введением ограничения  $t \leq p/(2\omega_0)$  на значение задержки обеспечивается режим формирования плавно сопряженных откликов (пример экспериментальной осциллограммы на рисунке 5) и устранение методической девиации фазы отклика.

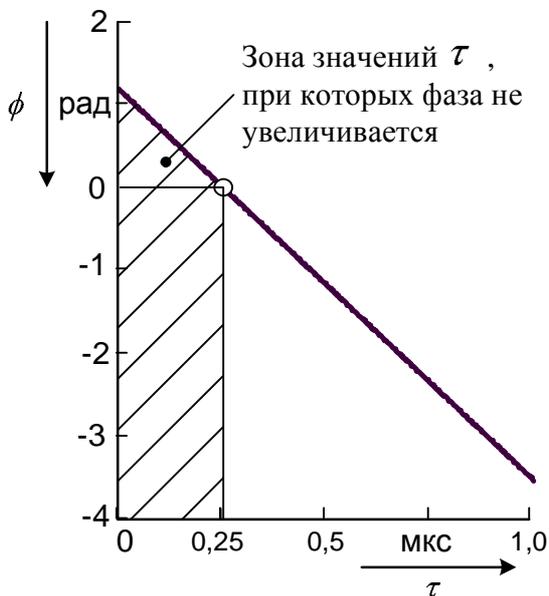
На основании разработанного принципа построения ФГП и проведенных теоретических и экспериментальных исследований отклика ПКК на последовательное воздействие разнополярных функций Хевисайда создана математическая модель, которая представлена системой уравнений (1).



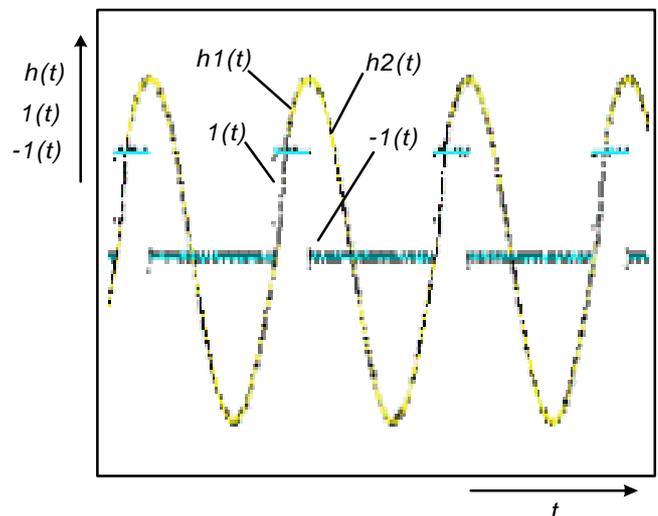
**Рисунок 2 – Формирование отклика ПКК на пару разнополярных функций Хевисайда**



**Рисунок 3 – Методическое увеличение фазы отклика ПКК**



**Рисунок 4 – Изменение фазы отклика от значения задержки между инициирующими воздействиями**



**Рисунок 5 – Осциллограмма сопряженных откликов ПКК на пары функций Хевисайда**

Известно, что влияние скорости относительного перемещения ВТП и контролируемого объекта проявляется в увеличении от 3 до 15 % значения внесенного сопротивления, что увеличивает затухание переходной характеристики. Это позволило при разработке математической модели не учитывать относительное перемещение датчика и ВЭПО. В разработанной модели основное соотношение  $U_{com} = h_2(t)$ , определяющее время  $Dt$ , является трансцендентным. При периодическом повторении пар инициирующих функций Хевисайда колебательный процесс на ПКК практически превращается в непрерывные колебания с частотой первой гармоники. Колебательный процесс на ПКК длится не более одного периода, затем вновь инициируется. В отсутствие воздействия на ПКК со стороны ВЭПО добротность контура ПКК существенно больше 1, и уменьшение амплитуды колебательного процесса за один период составляет от 0,5 до 2,5 %. Это позволило провести гармонизацию математической модели путем замены экспоненциально-тригонометрической функции

на тригонометрическую синусоидальную, амплитуда которой соответствует амплитуде переходной функции. В этом случае ограничение  $t \leq p/(2w_0)$  может быть снято.

$$\left\{ \begin{array}{l} L(h) \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt + iR(h) = U \cdot [1(t) - 1(t - t)]; \\ U_{com} = h_2(t) = U \{ \exp[-R(h)(t - t)/2L(h)] \cos[w_0(t - t) + \arctg \frac{\sin w_0 t}{1 - \cos w_0 t} - w_0 t] \}; \\ U = \frac{1 - \cos w_0 t}{\cos(\arctg \frac{\sin w_0 t}{1 - \cos w_0 t})}; \\ \Delta t = t_2 \{ U_{com} = h_2(t) \} - t; \\ Sign(t) = \begin{cases} 1, npu \Delta t > \Delta t_c; \\ 0, npu \Delta t < \Delta t_c; \end{cases} \\ t \leq p/(2w_0). \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $L(h), R(h)$  – соответственно, зависящие от расстояния  $h$  индуктивность и сопротивление контура ФГП;  $i$  – мгновенное значение тока в контуре;  $U$  – значение напряжения импульсного воздействия;  $U_{com}$  – амплитуда напряжения компарирования;  $h_2(t)$  – ниспадающая ветвь переходной функции;  $Sign(t)$  – функция выхода ФГП;  $\Delta t_c$  – зона нечувствительности фазового компаратора;  $w_0$  – круговая частота.

В соответствии с разработанной моделью и принятыми допущениями предложена структурная схема фазогенераторного датчика (рисунок 6), на основании которой разработана электрическая принципиальная схема. Активная часть электрической схемы датчика реализована в виде специализированного кристалла микросхемы, изготовленного по серийной КМОП технологии.

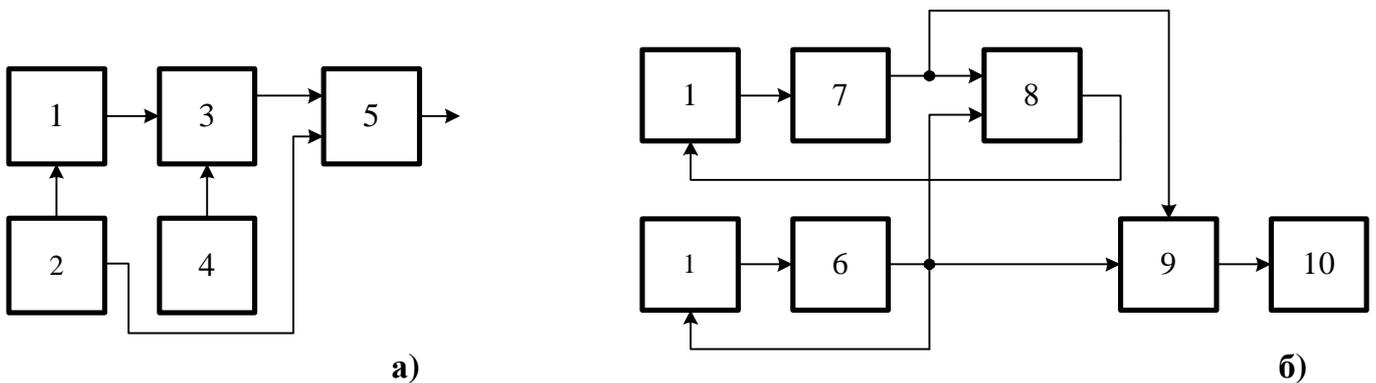
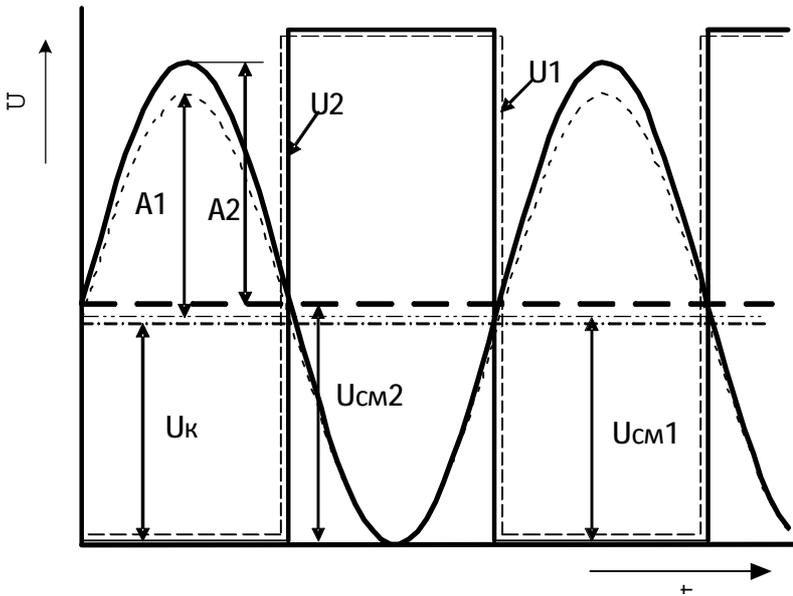


Рисунок 6 - Структурные схемы ФГП, соответствующая математической модели (а) и гармонизированной модели (б):

- 1 – ПКК; 2 – генератор функций Хевисайда; 3 – аналоговый компаратор;
- 4 – источник напряжения компарирования; 5, 9 – фазовый компаратор;
- 6, 7 – усилители с релейной проходной динамической характеристикой;
- 8 – логический элемент 2-И; 10 – выходной ключ

Принцип действия датчика на основе гармонизированной модели поясняется диаграммами рисунка 7. Два автогенератора, один из которых опорный и синхронизирует другой, формируют на своих ПКК практически синусоидальные напряжения с первоначально равными амплитудами  $A1$  и  $A2$ , которые после смещения уровня на  $U_{см}$  поступают на аналоговые компараторы с уровнем компарирования  $U_k$  и преоб-



**Рисунок 7 – Диаграммы сигналов в датчике на основе структурной схемы, построенной по гармонизированной модели**

разуются в импульсные напряжения  $U1$  и  $U2$ . Напряжение синхронизируемого генератора изменяется по амплитуде и фазе под воздействием ВЭПО. Появляющаяся временная разница между фронтами напряжений  $U1$  и  $U2$  (фазовый сдвиг) компарируется компаратором, а результат выводится на выходной ключ.

**В третьей главе** проводятся теоретические исследования фазогенераторного датчика на разработанном принципе: определена и анализируется статическая характеристика, ее зависимость от электропроводности ВЭПО, исследу-

ются динамические характеристики и погрешности, чувствительность к конструктивно-технологическим параметрам, даны рекомендации по проектированию.

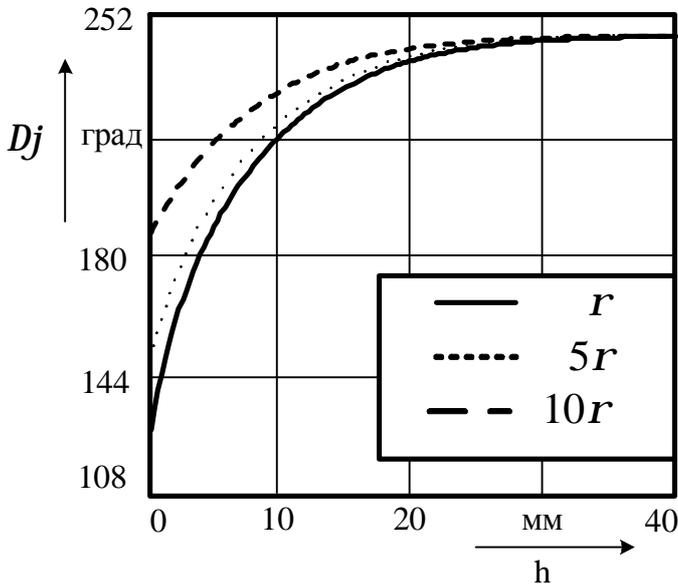
Анализом гармонизированной математической модели получено выражение статической характеристики  $j(h)$  датчика – зависимости фазы фронта напряжения  $U1$  от расстояния  $h$  до ВЭПО:

$$j(h) = \left\{ p - \arcsin \left[ \frac{p}{2} ka \left( R_k + \frac{k_{cb}^2(h) w^2 r p l \Theta D L_k (\pm L_{ТП})}{r^2 p^2 D^2 + w^2 l^2 \Theta^2 L_{ТП}^2} \right) (R^H + R_o) w_2^2 C_c^2 - 1 \right] \right\}$$

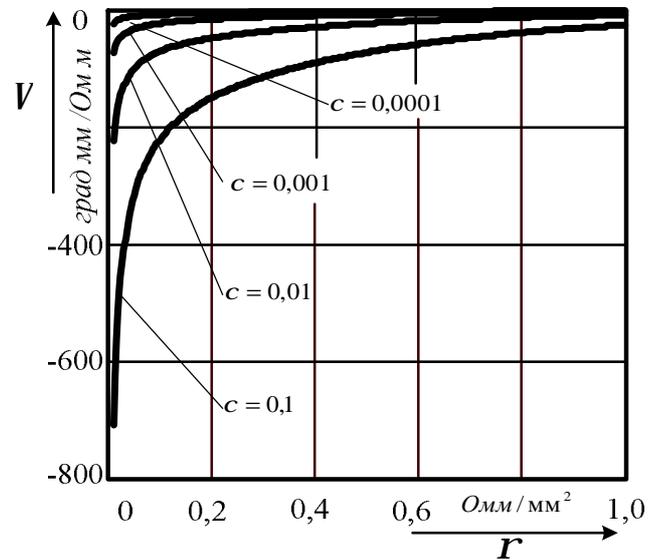
где  $k$  – коэффициент компарирования, равный отношению напряжения компарирования  $U_c$  к напряжению питания  $U_{П}$ ;  $a$  – коэффициент использования напряжения питания;  $R_k$  – сопротивление контура;  $k_{cb}(h)$  – аналитическая зависимость коэффициента связи ПКК и ВЭПО;  $r$  – удельное сопротивление ВЭПО;  $D$  – диаметр катушки индуктивности ПКК;  $l$  – длина контура наведенного тока;  $Q$  – глубина скин-слоя;  $L_k$  – индуктивность ПКК;  $(\pm L_{ТП})$  – индуктивность ВЭПО (минус для диамагнитных объектов, плюс – для ферромагнитных);  $R^H$  – выходное сопротивление активного элемента относительно шины питания;  $R_o$  – токоограничивающее сопротивление;  $C_c$  – емкость конденсатора связи.

На рисунке 8 в качестве примера представлены расчетные статические характеристики ФГП при частоте повторения пар иницирующих воздействий 1 МГц,  $L_k = 125$  мкГн и  $C_c = 235$  пФ для различных по отношению к меди значений удельного сопротивления материала ВЭПО, являющегося его основной характеристикой. Теоретическими исследованиями установлено, что при уменьшении значения частотного фактора  $c = f(q, w, L_k)$  чувствительность характеристики  $j(h)$  к изменению  $r$  снижается (рисунок 9). Частотный фактор  $c$  является наиболее влияющим множителем в выражении чувствительности и функцией, в том числе и электрофизических свойств материала ВЭПО, которые, как правило, заданы, потому для уменьшения влияния  $r$  рекомендуется увеличивать собственную частоту ПКК. Из анализа соотношения мощности в колебательном контуре и максимальной мощности потерь

в материале ВЭПО установлено, что коэффициент компарирования  $k$  следует назначать не менее значения  $k \geq k_{сб}^2(h=0)R_k / R^{\sim}$  где  $R^{\sim}$  – сопротивление кольцевого участка материала ВЭПО, в котором наводится вихревой ток от ПКК. Например, для макетного образца датчика  $k \geq 0,3$ .



**Рисунок 8 – Статическая характеристика для различных значений удельного сопротивления объекта**



**Рисунок 9 - Чувствительность  $V = \partial j(h) / \partial r$  статической характеристики к вариации  $r$  для различного частотного фактора  $c$**

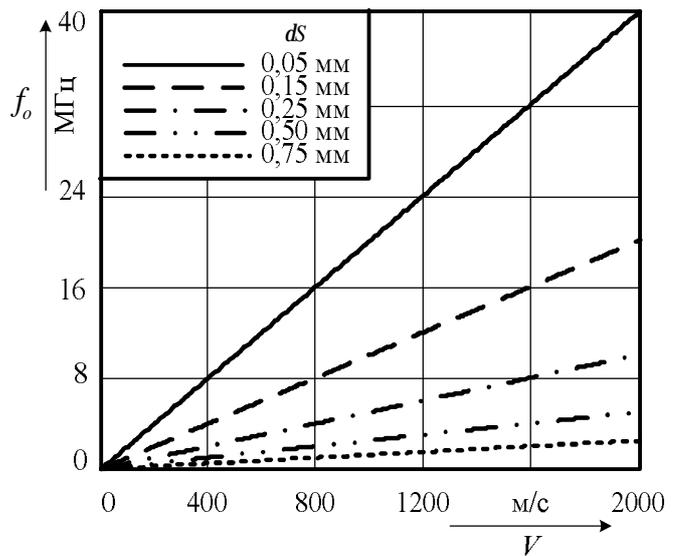
В выражении для статической характеристики  $j(h)$  множитель  $(R^H + R_o)$  определяет значение начального фазового сдвига. Исследования чувствительности статической характеристики  $j(h)$  к вариации ограничительного сопротивления  $R_o$  показали, что начальный фазовый сдвиг может быть компенсирован выбором значения сопротивления  $R_o$ . Значение выходного сопротивления  $R^H$  относительно шины питания активного элемента имеет аналогичное влияние на  $j(h)$ . Для уменьшения влияния рекомендуется выбирать усилительные элементы с возможно меньшим значением  $R^H$ , например, реализованных на основе КМОП структур.

Теоретическим анализом установлено, что рабочий диапазон частот датчика составляет от 0 Гц до максимальной частоты  $f_{\max}$ , которая определяется соотношением:  $f_{\max} \leq 0,5f_o$ , где  $f_o$  – частота следования пар инициирующих функций. В соответствии с разработанным принципом действия период контроля фазовых (временных) соотношений между фронтами импульсов, сформированных из переходных функций ПКК, равен периоду  $T$  инициализации переходных функций. Задержка срабатывания датчика не превышает  $t_{ср} \leq T$ . Максимальная погрешность  $dt$  длительности временного интервала, сформированного датчиком на последовательные разнонаправленные воздействия, не превышает  $2/f_o$ . Установлено, что линейная разрешающая способность  $dS$  датчика при движении ВЭПО параллельно активной поверхности датчика с линейной скоростью  $V$ , определяется соотношением  $dS = V/f_o$ . На рисунке 10 представлены расчетные линии равной разрешающей способности  $dS$  для  $f_o$  от 0 до 40 МГц и  $V$  от 0 до 2000 м/с, которые могут быть использованы при проектировании датчика для выбора частоты  $f_o$ .

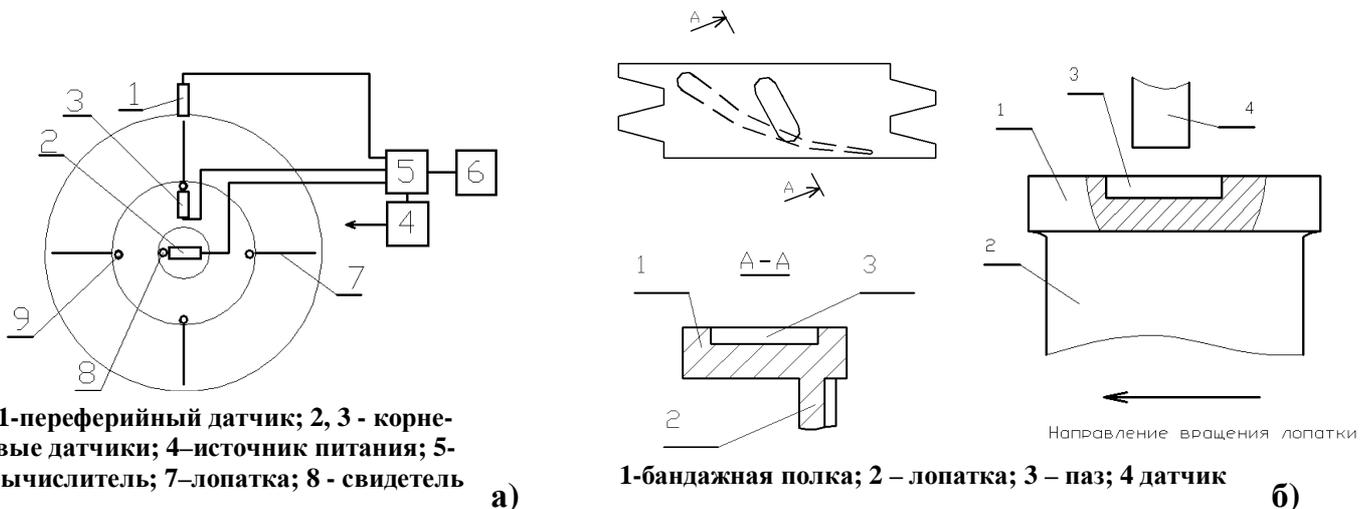
В завершении теоретических исследований проведена разработка устройств контроля амплитуды колебаний лопаточных венцов турбомашин на основе разработанного датчика. На рисунке 11 приведены примеры запатентованных технических решений (патенты РФ 100135 и 99826) для турбомашин со свободными и бандажированными торцами лопаток.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям, направленным на подтверждение достоверности основных теоретических положений, работоспособности датчика и достижения улучшенных по сравнению с аналогом метрологических характеристик, а также описанию примеров применения разработанного датчика в системах контроля лопаточных венцов турбомашин.

Исследование формирования непрерывной последовательности переходных процессов в ПКК при воздействии инициирующих импульсов и оценка влияния их временных параметров проводилось на установке согласно рисунку 12.



**Рисунок 10** – Зависимость  $f_0(V)$  для различных значений разрешающей способности  $ds$



**Рисунок 11** – Примеры применения фазогенераторного датчика в устройствах контроля амплитуды колебаний лопаточных венцов турбомашин со свободными (а) торцами и бандажированными (б) торцами лопаток

Определение динамических параметров быстродействующего ФГП методом механического перемещения тестовой пластины сопряжен со значительными трудностями. Разработан электронный способ (патент РФ 2046362), суть которого состоит в периодическом внесении сопротивления потерь в ПКК путем коммутации плоского контура (КПК) электронным коммутатором и контроле состояния выхода ФГП. Теоретическая оценка сопоставимости метода КПК с механическим проводилась сравнением значений вносимых сопротивлений в контур ФГП и показала, что эти сопротивления имеют один порядок. Так, например, для параметров макетного образца их расчетное соотношение составило 1,44.

Проведенными методом ПКК экспериментами (схема стенда – на рисунке 13, осциллограмма – на рисунке 14) установлены динамические характеристики датчика для четырех вариантов макетного образца ФГП, результаты приведены в Таблице 1.

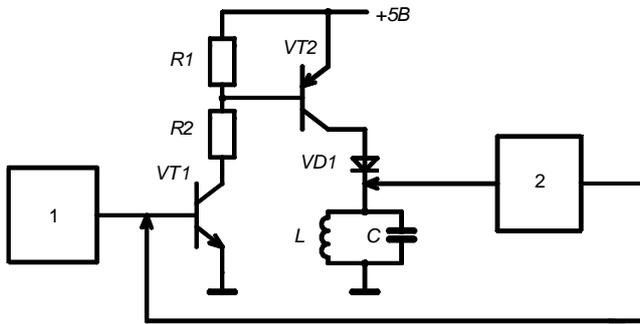


Рисунок 12 – Схема установки для оценки переходных процессов на ПКК: 1-генератор импульсов; 2-цифровой осциллограф

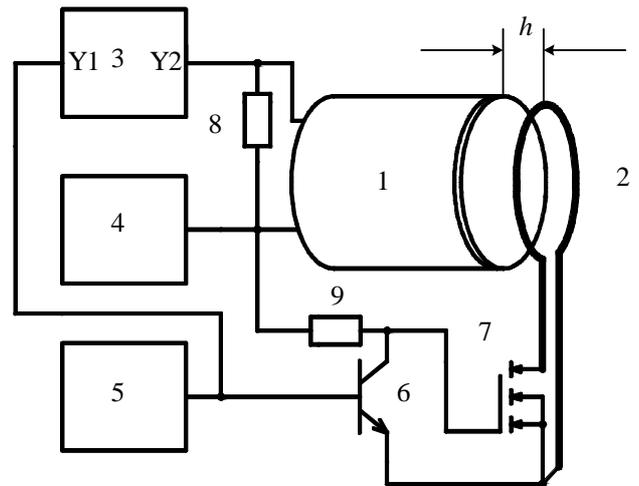


Рисунок 13 – Схема стенда для определения динамических показателей датчика: 1-датчик; 2-ПКК; 3-цифровой осциллограф; 4-блок питания; 5-импульсный генератор; 6, 7-управляющий и коммутирующий транзисторы; 8, 9 – нагрузочные резисторы

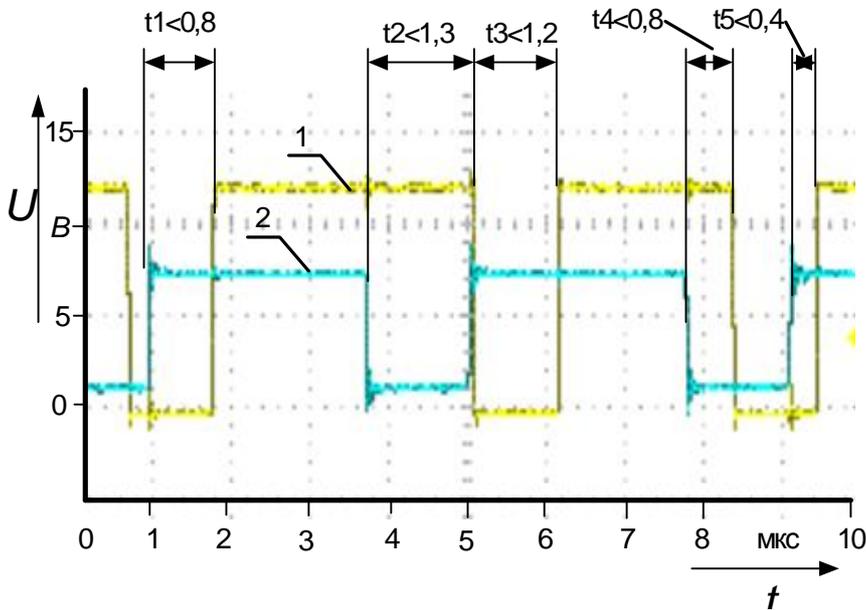
Таблица 1. Экспериментальные динамические характеристики макетных образцов датчик

| $f_0$ , кГц | $f_{\max}$ , кГц | $f_0 / f_{\max}$ | $t_{cp \max}$ , мкс |                |
|-------------|------------------|------------------|---------------------|----------------|
|             |                  |                  | увеличение $r$      | уменьшение $r$ |
| 802,203     | 400,948          | 0,495            | 1,24                | 1,24           |
| 2225,222    | 1113,123         | 0,493            | 0,44                | 0,44           |
| 6344,278    | 3311,238         | 0,492            | 0,16                | 0,16           |
| 8117,575    | 4001,964         | 0,493            | 0,12                | 0,12           |

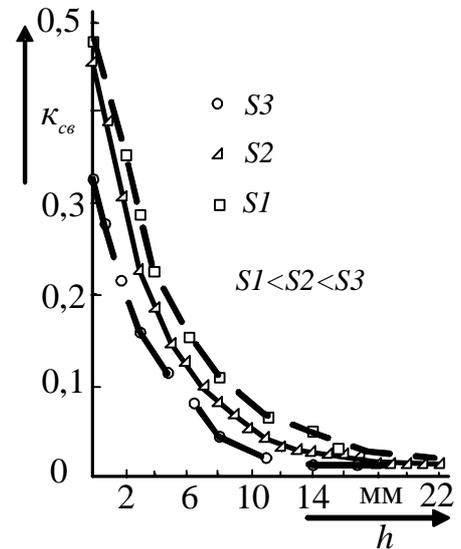
Полученные значения динамических параметров фазогенераторного датчика соответствуют разработанным теоретическим положениям - относительная максимальная частота  $f_{\max}$  равна 0,495 и не превышает  $0,5f_0$ , задержка  $t_{cp}$  срабатывания согласуется со значением  $f_0$ . При этом зависимость динамических параметров от частоты основного воздействия не выявлена.

Ввиду теоретической сложности и возможной большой погрешности вычисления взаимной индуктивности тестовой электропроводящей пластины и ПКК для анализа статической характеристики расчет был заменен на экспериментальное определение  $\kappa_{ce}(h)$  воздушного трансформатора тестовая пластина - ПКК с последующей математической обработкой результатов, при этом в качестве тестовой пластины использован плоский кольцевой контур диаметром 14 мм из медной проволоки диаметром 1,5 мм. Установлено, что зависимость  $\kappa_{ce}(h)$  для макетного образца описывается соотношением  $\kappa_{ce}(h) = 0,345e^{-0,167h}$ . Коэффициент связи зависит от площади взаимного перекрытия активной поверхности датчика и поверхности ВЭПО (рисунок 15) и для увеличения расстояния срабатывания необходимо, чтобы активная площадь датчика не превышала взаимодействующую площадь ВЭПО.

Точность срабатывания датчика исследовалась путем многократного (по 50 отсчетов) определения расстояния его срабатывания при включении  $h_{\text{ВКЛ}}$  и выключении  $h_{\text{ВЫК}}$  для тестовых пластин из четырех различных сплавов. В Таблице 2 представлены статистические оценки: среднеарифметические расстояния включения  $h_{\text{ВКЛ}}$  и выключения  $h_{\text{ВЫК}}$ , среднеквадратические отклонения  $S_{\text{ВКЛ}}$  и  $S_{\text{ВЫК}}$ , гистерезис  $Dh$  и поправочный коэффициент  $K_{\text{ТП}}$  относительно стали.



**Рисунок 14** - Оциллограммы задержки отклика датчика (1) на ступенчатое изменение сопротивления объекта контроля (2):  $t_1, t_3$  и  $t_5$  – задержки срабатывания при увеличении удельного сопротивления,  $t_2$  и  $t_4$  – при уменьшении



**Рисунок 15** – Зависимость коэффициента связи от площади взаимодействия

Кроме того, исследовалась точность срабатывания серии датчиков в количестве 23 штук. Расстояние срабатывания на стальную тестовую пластину с доверительной вероятностью 0,95 составило  $7,34 \pm 0,04$  мм.

**Таблица 2.** Экспериментальные характеристики срабатывания макетного образца датчика

| Материал | $h_{\text{ВКЛ}}$ , мм | $S_{\text{ВКЛ}}$ , |      | $h_{\text{ВЫК}}$ , мм | $S_{\text{ВЫК}}$ , |      | $\Delta h$ , % | $K_{\text{ТП}}$ |
|----------|-----------------------|--------------------|------|-----------------------|--------------------|------|----------------|-----------------|
|          |                       | мм                 | %    |                       | мм                 | %    |                |                 |
| Сталь    | 7,38                  | 0,009              | 0,12 | 7,44                  | 0,010              | 0,13 | 0,81           | 1,00            |
| алюминий | 7,42                  | 0,009              | 0,12 | 7,48                  | 0,011              | 0,15 | 0,81           | 1,01            |
| латунь   | 7,63                  | 0,012              | 0,16 | 7,73                  | 0,009              | 0,12 | 1,31           | 1,03            |
| медь     | 7,78                  | 0,010              | 0,13 | 7,87                  | 0,011              | 0,14 | 1,16           | 1,05            |

Установлено, что значение среднего квадратического отклонения при включении и выключении не превышает, соответственно, 0,16 % и 0,15 %; значение гистерезиса не превышает 1,31 %; девиация расстояния срабатывания на тестовые пластины из цветных металлов относительно стали не превышает 5 %.

Проведенные экспериментальные исследования метрологических характеристик макетных образцов разработанного датчика, таким образом, подтвердили достоверность заложенных в его основу теоретических положений, работоспособность датчика и достижение требуемых точностных и динамических характеристик.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Проведенный анализ состояния вопроса контроля высокоскоростных электропроводящих объектов, техническое состояние которых характеризуется параметрами перемещения или взаимного расположения отдельных элементов, на примере контроля колебаний лопаток турбомашин дискретно-фазовым методом, показал, что применяемые в настоящее время импульсные индукционные и емкостные датчики обладают существенными погрешностями, зависящими, в частности, от параметров движения и материалов элементов объекта контроля, что обуславливает необходимость поиска альтернативных принципов построения датчиков.

2. Наиболее перспективным преобразователем для датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов является разновидность вихретокового преобразователя (ВТП) – фазогенераторный преобразователь (ФГП), основанный на явлении взаимной синхронизации двух генераторов. Обладая высокой чувствительностью, высоким уровнем и фазовой модуляцией выходного сигнала, ФГП обеспечивают высокую точность и помехозащищенность, при этом, однако, существующие принципы их построения не обеспечивают требуемых динамических характеристик для целей контроля высокоскоростных электропроводящих объектов.

3. Разработан принцип построения быстродействующего фазогенераторного индуктивного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов, заключающийся в инициировании разнополярными функциями Хевисайда пар переходных характеристик параллельного колебательного контура, последующего преобразования их в прямоугольный импульс и порогового контроля разности фаз иницирующего сигнала и сигнала с колебательного контура.

4. Разработана математическая модель фазогенераторного датчика на основе аппарата переходных функций ПЧК, учитывающая электрофизические свойства объекта контроля, параметры параллельного колебательного контура и параметры сигнала возбуждения, для анализа которой сформирован ее гармонизированный рабочий вариант путем перехода от экспотенциально-тригонометрической формы записи к тригонометрической, и синтезирована статическая характеристика датчика.

5. На основе теоретических исследований влияния характеристик объекта контроля и конструктивных параметров датчика на его метрологические характеристики установлено, что быстродействие датчика ограничено практически только частотой следования иницирующих воздействий  $f_0$ , при этом получены условия инвариантности характеристики датчика к значению удельного электрического сопротивления материала объекта контроля. В частности установлено, что: чувствительность датчика к вариации удельного сопротивления объекта контроля при его значениях, соответствующих сплавам от меди до титана, несущественна и возрастает в области очень малых значений сопротивления, при этом увеличение частоты иницирующих функций обеспечивает инвариантность характеристики датчика и в области малых значений удельного сопротивления объекта; задержка срабатывания  $t_{cp}$  не превышает периода  $T = 1/f_0$  инициализации переходных процессов на контуре ( $t_{cp} \leq T$ ); максимальная рабочая частота не более  $0,5f_0$ ; максимальная погрешность  $dt$  временного интервала, сформированного датчиком на последовательные разнонаправленные воздействия, не превышает  $2/f_0$ ; линейная разрешающая способность при движении контролируемого объекта параллельно активной поверхности со скоростью  $V$  определяется, как  $dS = V/f_0$ .

6. Сформулированы научно обоснованные рекомендации по назначению конструктивно-технологических параметров датчиков: для устранения методической погрешности длительность задержки следования функций Хевисайда в инициирующей паре должна удовлетворять условию  $t \leq p/(2w_0)$  (для варианта гармонизированной модели ограничение может быть снято); назначение частоты инициирующих воздействий на ПКК должно проводиться исходя из требуемого значения рабочей частоты с учетом задержки срабатывания и линейной разрешающей способности; для обеспечения индифферентности к вариациям удельного сопротивления следует увеличивать значения частоты инициирующих функций; коэффициент компарирования  $k$  следует назначать в соответствии с выражением  $k \geq k_{св}^2(h=0)R_k / R^*$ ; в качестве активных элементов схемы датчика необходимо выбирать элементы с низким значением выходного сопротивления относительно шины питания, например КМОП элементы; технологическую настройку начального положения рабочих фронтов необходимо проводить изменением токоограничивающего сопротивления.

7. Для метрологического контроля динамических свойств быстродействующих фазогенераторных датчиков разработан бесконтактный электронный метод коммутируемого плоского контура, теоретически доказана метрологическая сопоставимость его результатов результатам метода перемещения тестовых пластин.

8. Разработаны и запатентованы структурная и принципиальная схемы фазогенераторного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов, разработан и изготовлен по КМОП технологии кристалл специализированной микросхемы, содержащий активную часть схемы датчика.

9. Проведенные экспериментальные исследования метрологических характеристик макетных образцов разработанного датчика, подтвердили достоверность заложенных в его основу теоретических положений, работоспособность датчика и достижение улучшенных по сравнению с аналогом динамических характеристик. В частности, установлено, что: максимальная частота переключения макетного образца с диаметром активной части 14 мм составляет 4001,964 кГц, задержка срабатывания не более 0,12 мкс, расстояние срабатывания – 7,38 мм, значение гистерезиса – не более 1,31 %, девиация расстояния срабатывания на тестовые пластины из цветных металлов относительно стали не превышает 5 %. Зависимость динамических параметров от частоты основного воздействия не выявлена.

10. Разработаны и запатентованы два технических решения по использованию предложенного датчика в устройствах и системах контроля колебаний лопаток турбомашин.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Журналы из перечня изданий, рекомендованных ВАК*

1. Милюшин, Н.Н. Фазогенераторный индуктивный датчик приближения / Н.Н. Милюшин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 8. – С. 34–36.

2. Милюшин, Н.Н. КМОП-микросхема фазогенераторного датчика приближения / Н.Н. Милюшин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 9. – С. 33–34.

3. Подмастерьев, К.В. Фазогенераторный датчик контроля приближения токопроводящего объекта / К.В. Подмастерьев, Н.Н. Милюшин // Датчики и системы. – 2009. – № 9. – С. 61–67.

4. Милюшин, Н.Н. Анализ взаимодействия индуктивного датчика приближения токопроводящей среды и коммутируемого плоского контура / Н.Н. Милюшин // Известия

ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.– 2009. – № 2/274(560). – С. 75–80.

5. Милюшин, Н.Н. Принцип построения фазогенераторного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов / Н.Н. Милюшин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 6-2 (284). – С. 89–94.

*Прочие издания*

6. Милюшин, Н.Н. Индуктивный датчик приближения / Н.Н. Милюшин, В.Б. Клейменов. Калуга: Калужский ЦНТИ, №230, 1994. – 2 с.

7. Милюшин Н.Н. Способ определения быстродействия датчика приближения токопроводящей среды посредством коммутируемого плоского контура / Н.Н. Милюшин // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – 2005. – № 3. – С. 2–4.

8. Милюшин Н.Н. Хэвисайдовский фазогенераторный преобразователь / Н.Н. Милюшин // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. Ч.2. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2011. – С.62–66.

9. Подмастерьев, К.В. Влияние удельного сопротивления объекта на статическую характеристику быстродействующего фазогенераторного преобразователя систем контроля электропроводящих объектов / К.В.Подмастерьев, Н.Н. Милюшин // Информационные системы и технологии: материалы Международной научно-технической интернет-конференции. В 3 т. Т3. – Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2011. – С. 210–214.

10. Милюшин, Н.Н. Классификация фазогенераторных преобразователей / Н.Н. Милюшин // Динамика научных исследований: материалы VII Международной научно-технической конференции. Т.10. –1- София: Бял ГРАД\_БГ, 2011. – С. 30–33.

11. Милюшин, Н.Н. Быстродействующий фазогенераторный датчик / Н.Н. Милюшин, К.В. Подмастерьев // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: тезисы докл. XX Международного научно-технического семинара. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. – С. 122–123.

12. Пат. 1703975 Российская Федерация G01D5/22. Бесконтактный датчик приближения объекта / Клейменов В.Б., Курков В.И., Милюшин Н.Н. – Оpubл.07.01.1992, Бюл. № 1.

13. Пат. 2036434 Российская Федерация G01D5/22. Быстродействующий датчик приближения объекта / Клейменов В.Б., Милюшин Н.Н. – Оpubл. 27.05.1995, Бюл. № 15.

14. Пат. 2037780 Российская Федерация G01D5/22. Быстродействующий бесконтактный датчик / Милюшин Н.Н., Стасев Г.И. – Оpubл. 19.06.1995, Бюл. № 17.

15. Пат. 2046362 Российская Федерация G01R27/26. Способ определения максимальной частоты срабатывания индуктивного датчика приближения / Клейменов В.Б., Милюшин Н.Н. – Оpubл. 20.10.1995, Бюл. № 29.

16. Пат. 98576 Российская Федерация G01D5/22. Фазогенераторный бесконтактный датчик / Подмастерьев К.В., Милюшин Н.Н. – Оpubл. 20.10.2010, Бюл. № 29.

17. Пат. 99826 Российская Федерация F01D25/06. Устройство контроля амплитуды колебаний бандажированных рабочих лопаток дискретно-фазовым методом / Подмастерьев К.В., Милюшин Н.Н. – Оpubл. 27.11.2010, Бюл. № 36.

18. Пат. 100135 Российская Федерация F01D25/06. Устройство контроля колебаний лопаток турбомашин / Подмастерьев К.В., Милюшин Н.Н. – Оpubл. 10.12.2010, Бюл. № 34.

Подписано к печати 15.01.2013 г. Формат 60x84 1/16.

Объем 1,0 усл. п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 156

-----  
Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.