

На правах рукописи

БЫЧКОВ Анатолий Владимирович

**СИСТЕМА АКТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ВИБРОКОНТРОЛЯ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ**

Специальность

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Славутский Леонид Анатольевич

Официальные оппоненты: **Баширов Мусса Гумерович**
доктор технических наук, профессор, Институт нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (филиал в г. Салавате), заведующий кафедрой электрооборудования и автоматики промышленных предприятий

Ившин Игорь Владимирович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск

Защита состоится «7» сентября 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.301.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», по адресу г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «26» мая 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06

Руссова
Наталья Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задачи вибрационного контроля оборудования являются актуальными для различных областей промышленности (электроэнергетика; газовая, нефтяная, угольная промышленности; авиа- и кораблестроение и т.д.). В частности, в электроэнергетической отрасли виброконтроль оборудования (генераторов, насосов, электроприводов, трансформаторов, реакторов) большинства электротехнических комплексов является неотъемлемой составляющей регламентных работ процесса эксплуатации. Следует отметить, что также существует необходимость контроля вибраций в техпроцессах, где вибрации являются не побочным эффектом, а необходимой их частью и специально создаются.

Электросетевой комплекс России характеризуется высокой степенью износа оборудования на электростанциях и в электрических сетях. Неотъемлемой частью обеспечения надежности и безопасности работы электротехнического оборудования является применение средств технического диагностирования их неисправностей. Проведение эффективной диагностики, не требующей вывода оборудования из работы, обеспечивает возможность перехода на эксплуатацию не по регламентным срокам технического обслуживания, а по фактическому техническому состоянию контролируемых объектов.

Для контроля вибраций применяются как контактные, так и бесконтактные (дистанционные) методы. Контактная вибродиагностика обеспечивает измерение вибраций корпуса или основания установки и не имеет «доступа» к подвижным её частям. Дистанционные методы заключаются в использовании лазерного (оптические методы) или ультразвукового излучения. Дистанционные оптические методы основываются на принципах интерферометрии, пространственного сканирования, являются высокоточными, но при этом оказываются дорогостоящими. Ультразвуковые (УЗ) методы относительно удобны, более доступны по цене по сравнению с оптическими методами, могут составить им серьезную конкуренцию.

Существующие импульсные УЗ методы (использующие локационный принцип), основаны на измерении времени прохождения волны, модуляции ее частоты и фазы. Частота и фаза отраженной волны зависят от измеряемых частот вибраций. Применяемые датчики с высокой добротностью и условия распространения ультразвука искажают сигналы. В предлагаемой системе контроля вибраций влияние этих факторов снижено за счет использования корреляционной обработки сигналов.

Предлагаемая в работе система измерения и контроля вибраций на основе активного ультразвукового зондирования позволяет проводить измерения как низкочастотных, так и высокочастотных вибраций. Комплексное (совместное) использование в системе контактных и бесконтактных принципов измерения позволяет получать больше информации о вибрациях контролируемого оборудования и, как следствие, больше информации о его состоянии. Задача совершенствования методики и средств диагностирования неисправностей

оборудования электротехнического комплекса является актуальной и соответствует «Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации на период до 2035 года», утвержденной распоряжением Правительства № 1523-р от 9 июня 2020 года.

Объектом исследования являются электротехнические комплексы и системы, имеющие в своем составе силовое электрооборудование, требующее контроля вибраций.

Предметом исследования является система виброконтроля электрооборудования с активным дистанционным ультразвуковым зондированием вибрирующих поверхностей.

Цель исследования – разработка модифицированного бесконтактного ультразвукового фазового метода и обоснование его использования в системе виброконтроля электрооборудования.

Задачи исследования. Для достижения обозначенной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка методик измерений для модифицированного бесконтактного УЗ фазового метода виброконтроля с применением линейной частотной модуляции и фазовой манипуляции сигналов, их корреляционной обработки.

2. Разработка программы моделирования и обработки сигналов для использования модифицированного бесконтактного УЗ фазового метода; теоретический анализ схем измерений в системе с бесконтактным виброконтролем электрооборудования.

3. Разработка и программно-аппаратная реализация узлов системы виброконтроля электрооборудования с использованием модифицированного бесконтактного УЗ фазового метода.

4. Экспериментальная проверка функционирования системы бесконтактного виброконтроля электрооборудования на основе модифицированного бесконтактного УЗ фазового метода.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в развитие теоретических основ вибродиагностики, в том числе и виброакустических, а также практического их развития внесли учёные: Айрапетов Э.Л., Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А., Герике Б.Л., Гольдин А.С., Застрогин Ю.Ф., Зусман Г.В., Ключев В.В., Костюков В.Н., Ланге Ю.В., Науменко А.П., Русов В.А., Таджибаев А.И., Явленский К.Н. и др.

Методы обработки импульсных ультразвуковых сигналов получили развитие во многих исследованиях отечественных и зарубежных ученых. Широко известны научные труды Батракова Д.О., Дичева Н.В., Жданкина В., Солдатов А.И., Сорокина П.В., Шульгиной Ю.В., Aldawi F.J., Angrisani L., Barshan B., Beck M.S., Bui G.T., Carotenuto R., Coulthard J., Elmer H., Granja F.S., Hirata S., Huang S.S., Huang Y.P., Lin Y., Ma S., Marioli D., Mažeika L., Nagy C., Paulson K.S., Sato Y., Teufel M., Velmurugan R., Wilkinson A.J., Xu B.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач по моделированию распространения и отражения УЗ волн от вибрирующей поверхности использовались методы математической физики и

математического моделирования. Для теоретического анализа полученных модельных сигналов, а также экспериментальных данных использовалась теория измерений, общая теория обработки сигналов и теория обработки и анализа вибрационных сигналов, а также методы функционального и объектно-ориентированного программирования. Экспериментальная работа проводилась с применением современных цифровых средств измерений. В работе были использованы элементы аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС).

Степень достоверности результатов.

Достоверность полученных в диссертационном исследовании основных научных положений и выводов подтверждается согласием результатов математического моделирования и экспериментальных измерений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Система вибрационного контроля электрооборудования с использованием модифицированного бесконтактного УЗ фазового метода зондирования.

2. Алгоритмы моделирования, обработки сигналов и схемы измерений для анализа вибраций с использованием предлагаемого метода УЗ контроля.

3. Методика и способы использования предлагаемого метода УЗ контроля совместно с контактными измерениями в системе виброконтроля электрооборудования.

Научная новизна:

1. Разработан модифицированный бесконтактный фазовый метод контроля вибраций, отличающийся импульсным зондированием и корреляционной обработкой ультразвуковых сигналов.

2. Разработаны и реализованы новые алгоритмы цифровой обработки фазомодулированных и фазоманипулированных импульсных УЗ сигналов, а также применения ИНС, которые позволяют контролировать параметры вибраций в широком диапазоне частот.

3. Реализована система виброконтроля при совместном использовании предлагаемого модифицированного бесконтактного УЗ фазового метода с традиционными контактными методами измерений. Показано, что это позволяет выявлять особенности вибраций подвижных частей электрооборудования.

Теоретическая значимость диссертационной работы определяется доказанной в исследованиях возможностью применения в электротехнических комплексах системы вибрационного контроля оборудования на основе активных бесконтактных ультразвуковых измерений.

Практическая значимость. Результаты могут быть использованы для повышения эффективности и информативности вибрационного контроля оборудования электротехнических комплексов. Предлагаемый подход позволяет дистанционно контролировать вибрации, как элементов корпуса электроустановок, так и подвижных элементов. Комплексный корреляционный и спектральный анализ, как ультразвуковых сигналов, так и сигналов, получаемых от контактных измерительных датчиков, установленных на

корпусе и основании фундамента, может эффективно использоваться для контроля состояния и исправности электроустановки для дальнейшей оценки её остаточного ресурса. Тема диссертационного исследования соответствует важным направлениям науки, техники и технологии в Российской Федерации: ядерная энергетика, энергосбережение, энергоэффективность.

Апробация результатов работы. Основные выводы, положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях: «Электротехнические комплексы и системы» – UralCon (г. Челябинск, 2019 г., 2020 г.); «Нигматуллинские чтения-2018» (г. Казань, 2018 г.); «САПР и моделирование в современной электронике» (г. Брянск, 2018 г.) и на всероссийских конференциях: «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (г. Чебоксары, 2017 г., 2019 г.); «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (г. Чебоксары, 2020 г.).

Внедрение результатов исследования. Результаты диссертационного исследования внедрены в ООО «Интеллектуальные сети» при разработке комплексных программ мониторинга и контроля технологических процессов на объектах энергетики; в ООО НПП «ЭКРА» при разработке функций мониторинга в устройствах защит; в учебный процесс ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова».

На программное обеспечение получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666569.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных и системах цитирования (WoS, Scopus и т.д.), 6 статей в российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 5 материалов докладов на международных и всероссийских конференциях. Получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы (115 наименований), 5 приложений. Общий объем диссертации 142 страницы, 71 рисунок и 7 таблиц.

Личный вклад автора. Создание экспериментальных лабораторных установок, разработка и программно-аппаратная реализация опытных макетов системы бесконтактного виброконтроля электрооборудования на основе модифицированного бесконтактного УЗ фазового метода; расчеты, обработка цифровых сигналов и математическое моделирование, а также интерпретация экспериментальных данных проводились автором лично. Совместная работа: обучение ИНС, анализ функционирования ИНС-алгоритмов, участие в работе по проведению экспериментов, разработка численных алгоритмов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлена цель и определены задачи. Сформулированы основные положения,

выносимые на защиту, показаны научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, степень разработанности темы, степень достоверности и апробация результатов работы, представлена структура диссертации.

В первой главе обоснована необходимость создания системы виброконтроля электрооборудования с активным ультразвуковым зондированием. Приведен обзор существующих методов виброконтроля, которые можно разделить на контактные и бесконтактные. Отмечены их достоинства и недостатки. Контактные методы являются наиболее распространенными на данный момент, но имеют ограничения в применении.

Рассмотрены различные методы обработки и анализа вибросигналов. Условно их можно разделить на методы анализа вибросигналов (виброскорости, виброускорения, виброперемещения) во временной области; анализ вибросигналов в частотной области. Также выделяют ряд более сложных алгоритмов, таких, как вейвлет-анализ, фрактальный анализ, кэпстральный анализ. Эти методы требуют более сложных вычислений, характеризуются сложностью интерпретации результатов расчета.

Бесконтактные методы – оптические и акустические, основаны на активном зондировании объекта контроля электромагнитной или акустической волной (локационные методы). Показано, что оптические методы являются наиболее точными, но неприменимы в условиях непрозрачности и загрязненности, а также являются дорогостоящими. Обоснована необходимость разработки и усовершенствования УЗ методов активного зондирования, прежде всего для виброконтроля подвижных частей электрооборудования.

Во второй главе диссертационной работы описаны подходы к измерениям и структура системы виброконтроля электрооборудования с модифицированным бесконтактным УЗ фазовым методом на примере контроля вибраций электродвигателя.

Система виброконтроля состоит (рисунок 1):

- из нескольких пар ультразвуковых преобразователей (УЗП) – передатчика и приемника;
- передающего (ПРД) и приемного (ПРМ) устройств;
- нескольких монтированных на корпусе электродвигателя контактных пассивных вибродатчиков пьезоэлектрического типа (ПД);
- цифрового лазерного тахометра (ЦЛТ);
- аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- блока анализатора (БА), подключенного к ЭВМ.

Объектом контроля лабораторной установки является асинхронный электродвигатель. Мощность 250 Вт, номинальная частота вращения 1370 об/мин (22,8 Гц). На валу двигателя установлен маховик (инерционная масса).

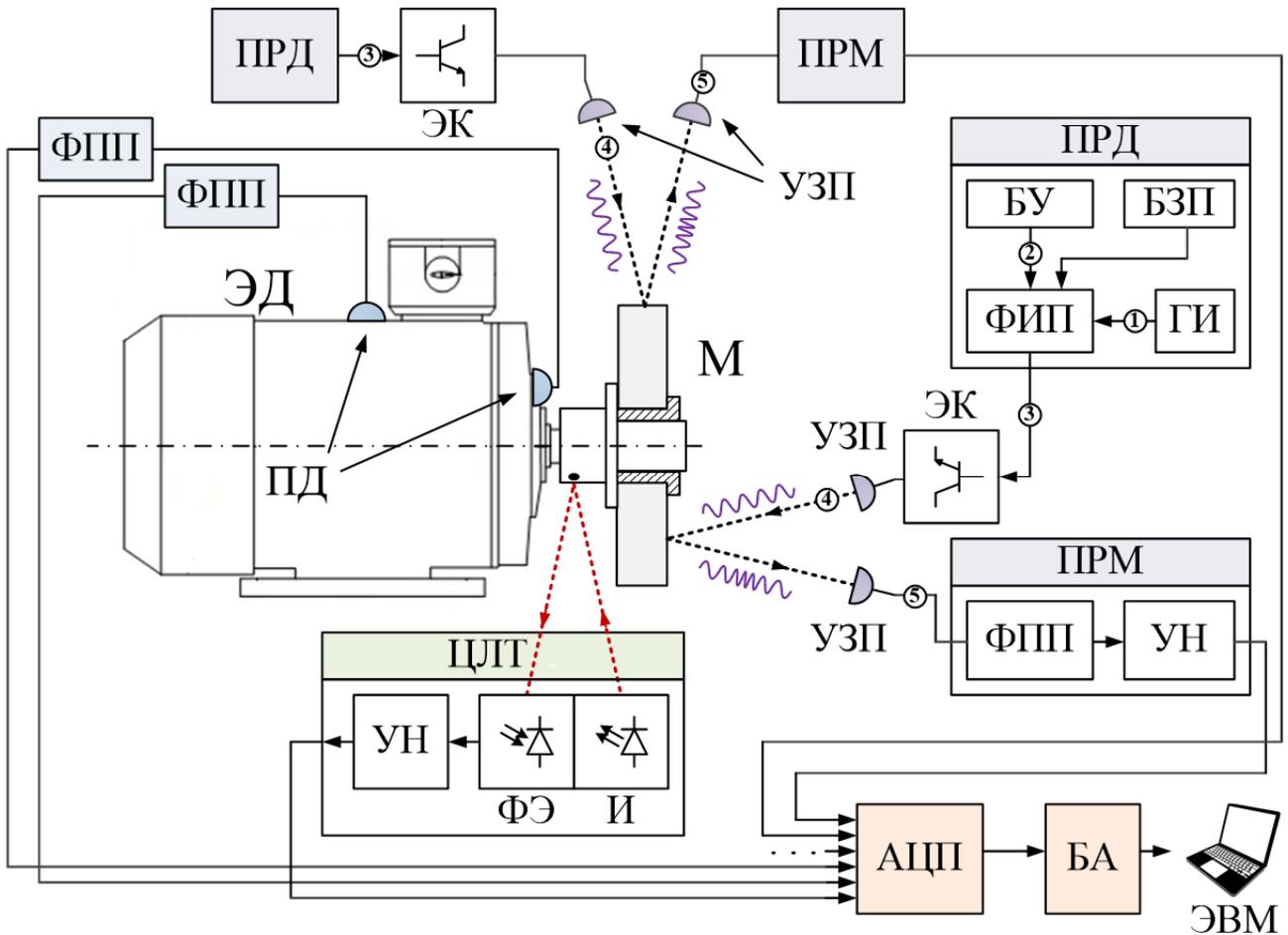


Рисунок 1 – Система контроля вибраций асинхронного электродвигателя

Схематично бесконтактный контроль показан на рисунке 2. Отражение ультразвука происходит от вибрирующей с частотой f_V поверхности. В генераторе (Г) формируются пакеты УЗ импульсов с частотой 40 кГц. Акустическая волна излучается и принимается ультразвуковыми преобразователями. Электрический сигнал с выхода приёмного УЗП подается на смеситель (С), на второй вход которого подается линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) эталонный сигнал. В интеграторе (И) вычисляется взаимная корреляционная функция (ВКФ) принимаемого модулированного по частоте и фазе сигнала с эталонным ЛЧМ сигналом. Спектральная обработка производится в спектральном анализаторе (СА).

Цифровая система формирования и обработки сигналов реализована на программируемой логической интегральной схеме (FPGA).

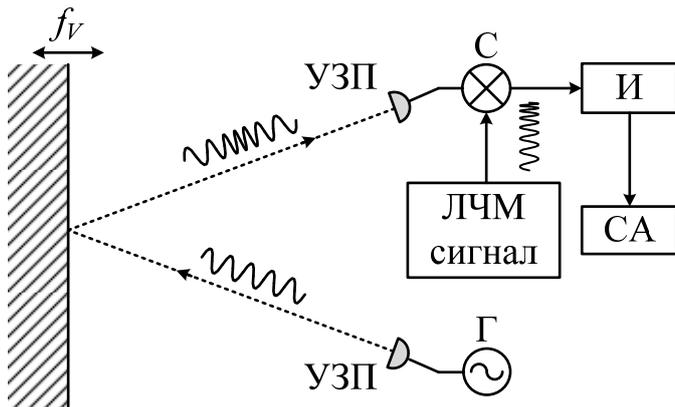


Рисунок 2 – Схема измерений и обработки сигналов

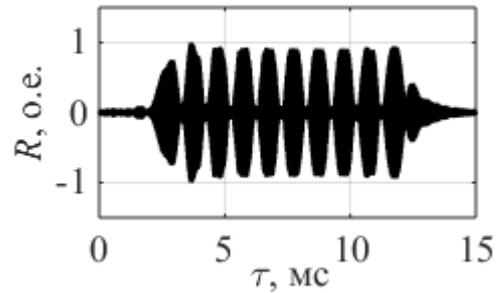


Рисунок 3 – ВКФ двух сигналов: приемного и ЛЧМ эталонного сигнала

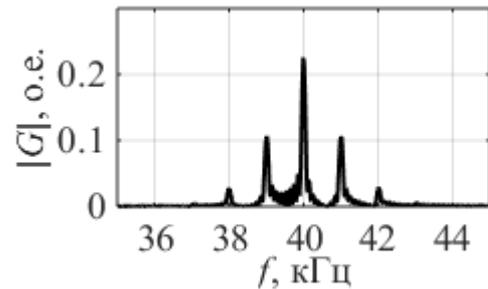


Рисунок 4 – Амплитудный спектр ВКФ

Обработка сигналов по предлагаемому алгоритму может проводиться цифровыми средствами. В простейшем случае лучевого приближения и гармонического закона колебаний отражающей поверхности, сигнал в приёмном УЗП может быть описан следующей формулой:

$$S(t) = A \sin \left\{ \omega \left[t - \frac{2(L - \delta_V \sin(\omega_V t + \varphi_V))}{c} \right] \right\} \quad (1)$$

где ω_V – циклическая частота колебаний поверхности $\omega_V = 2\pi f_V$;
 ω – циклическая частота УЗ сигнала;
 c – скорость звука;
 L – расстояние вдоль луча до поверхности;
 δ_V – проекция амплитуды колебаний поверхности на направление луча;
 φ_V – фаза колебаний поверхности;
 A – амплитуда УЗ импульса на опорной частоте сигнала.

Параметры δ_V , ω_V и φ_V , в формуле (1) – это основные параметры, характеризующие вибрационный процесс в электроустановке. Непрерывный УЗ сигнал с постоянной амплитудой и начальной фазой можно разложить в ряд по гармоническим составляющим:

$$\begin{aligned} S(t) &= A_0 \cos(\omega t + \alpha \sin(\omega_V t)) = A_0 [J_0(\alpha) \cos(\omega t) + J_1(\alpha) \cos((\omega + \omega_V)t) + \\ &+ J_1(\alpha) \cos((\omega - \omega_V)t) + J_2(\alpha) \cos((\omega + 2\omega_V)t) + J_2(\alpha) \cos((\omega - 2\omega_V)t) + \dots] \\ &= A_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\alpha) \cos((\omega + k\omega_V)t), \end{aligned} \quad (2)$$

где α – глубина фазовой модуляции, которая зависит от скорости звука, амплитуды вибраций и угла отражения;
 J_k – функции Бесселя k -го порядка.

Из (2) следует, что в спектре модулированного по фазе сигнала присутствуют боковые частоты $\omega \pm k\omega_V$ с амплитудами $J_k(\alpha)$. Соотношения между значениями функций Бесселя для одного значения глубины модуляции соответствуют соотношениям между пиками амплитудного спектра фазомодулированного УЗ сигнала, отраженного от вибрирующей поверхности.

На рисунке 3 показан пример взаимной корреляционной функции (ВКФ) вибросигнала в приёмном УЗП и ЛЧМ сигнала. На рисунке 4 – спектр этой функции. Длительность излучаемого и эталонного сигнала равны 10 мс. Частота колебаний отражающей поверхности $f_V = 1$ кГц. Погрешность измерения основной частоты вибраций зависит от частоты дискретизации сигналов и в данном случае составляет 2,4 %.

Таким образом, корреляционная обработка позволяет в течение длительности одного зондирующего импульса определить параметры вибраций с точностью в единицы процентов за счет подавления шумовых помех в приемном тракте. Диапазон частот при виброконтроле в данном случае ограничен соотношением периода вибраций и длительности УЗ импульса. Точность измерений быстро снижается с уменьшением частоты вибраций и длительности зондирующих импульсов. То есть, для контроля низкочастотных вибраций алгоритм измерений должен строиться на иных принципах. Для оценки параметров вибраций низких частот в работе предлагается методика обработки на основе цифрового формирования и корреляционной обработки модулированных сигналов.

Алгоритм реализации методики состоит из следующей последовательности шагов:

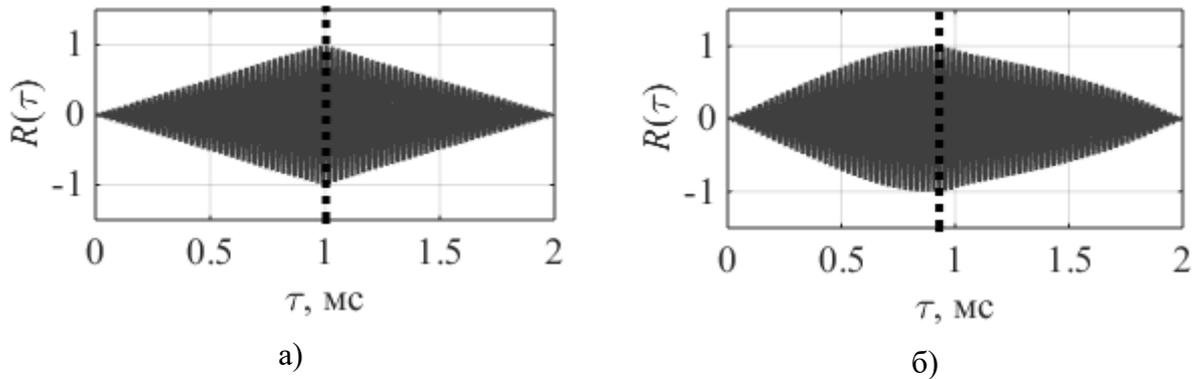
1. Формирование эталонного ЛЧМ сигнала $S_3(t)$.
2. Формирование сигнала излучения.
3. Расчет корреляционной функции $R(\tau)$ сигнала в приемном УЗП $S_R(t)$ с эталонным сигналом $S_3(t)$.
4. Расчет изменяющейся во времени мгновенной мощности ВКФ $P(\tau) = R^2(\tau)$.
5. Определение положения «центра тяжести» мощности ВКФ

$$\tau_c = \frac{\int \tau P(\tau) d\tau}{\int P(\tau) d\tau}. \quad (3)$$

Такой подход при вычислении ВКФ с эталонным ЛЧМ сигналом обладает высокой чувствительностью к частотно-фазовой модуляции сигнала в приемном УЗП и позволяет оценить изменение фазы даже при частотах вибраций в доли герца.

В качестве примера на рисунке 5 показано изменение формы ВКФ и смещения ее «центра тяжести» (ЦТ) при длительности импульса 1 мс, частоте вибраций 25 Гц и амплитуде 2 мм. Изменение формы ВКФ позволяет получить информацию о фазе колебаний поверхности во времени. Соответственно, при НЧ вибрациях измерение их частоты и амплитуды может производиться

дискретно, при помощи периодического импульсного зондирования. Зависимость может быть восстановлена по дискретным измерениям, частота которых соответствует частоте зондирующих УЗ импульсов. В остальном анализ параметров вибраций может производиться аналогично вибрациям на высоких частотах (см. рисунки 3 и 4). Погрешность измерения частоты составляет порядка $\sim 2\%$.



а) минимальная частотная расстройка, б) максимальная частотная расстройка

Рисунок 5 – ВКФ приемного сигнала и эталонного ЛЧМ сигнала и её «центр тяжести» (пунктир)

Активное зондирование вибрирующей поверхности предполагает возможность изменения угла отражения и длительности зондирующих импульсов. Это потенциально позволяет контролировать вибрации в диапазоне частот от долей герца до десятков килогерц.

При зондировании подвижных (вращающихся) поверхностей, как схематично показано на рисунке 6, путем установки датчиков в разных положениях возможно обнаружение различных явлений и, как следствие, измерение разных параметров. При расположении УЗП, показанном на рисунке 6 а, производятся измерения вибраций, а на рисунке 6 б, в спектрах УЗ вибросигналов начинает проявляться эффект «расщепления» главного пика: эффект Доплера (см. рисунок 7).

При моделировании рассеяния УЗ волн на поверхности вращающегося маховика (М) сигналы (рисунок 7) рассчитывались в виде интеграла по рассеивающей поверхности:

$$R = \iint_S f \left(\frac{e^{-ikr}}{r} \right) dS, \quad (4)$$

где R – коэффициент отражения;

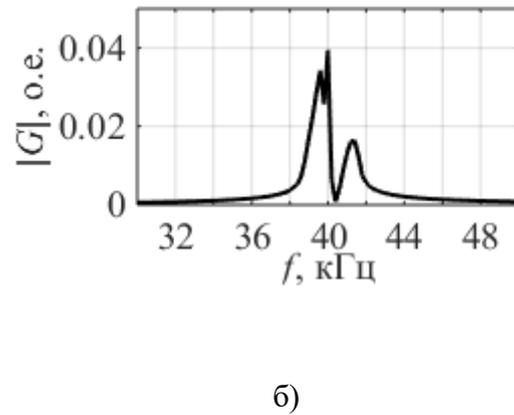
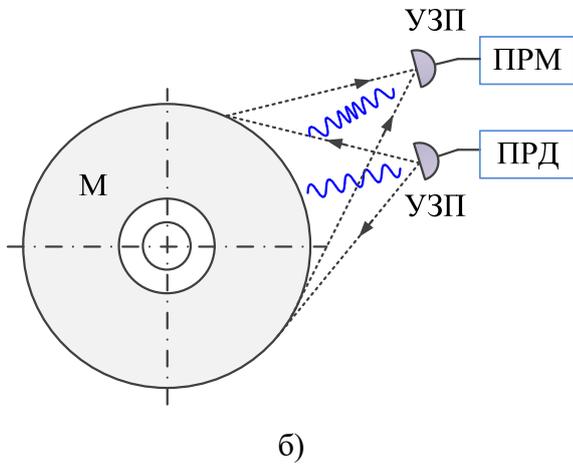
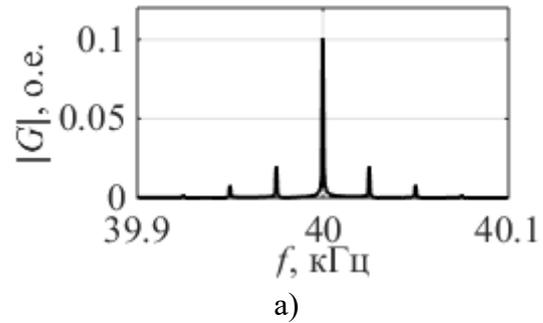
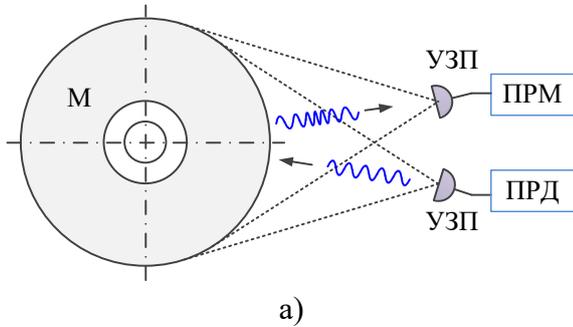
$k = \omega/c$ – волновое число;

r – радиус вектор от УЗП до точки поверхности.

Функция f включает в себя зависимость локального коэффициента отражения УЗ волны от угла падения. Интегрирование выражения (4), как правило, возможно только численно. Приблизительная оценка с учетом законов геометрической акустики показывает, что при скорости вращения 1481 об/мин

сдвиг частот составляет 1,1-1,3 кГц в зависимости от угла зондирования. Данные согласуются с рисунком 7 б.

В работах с соавторами показано, что обработка вибросигналов при помощи аппарата ИНС позволяет уменьшить время определения параметров вибраций и частоту импульсного зондирования.



а) контроль вибриаций;

а) спектр УЗ вибросигнала;

б) контроль скорости вращения

б) спектр УЗ сигнала с эффектом Доплера

Рисунок 6 – Схемы расположения УЗП

Рисунок 7 – Спектры УЗ сигналов

В третьей главе представлена программно-аппаратная реализация системы виброконтроля. Разработана программа для моделирования отражения УЗ волны от вибрирующей поверхности: «Программа моделирования и цифровой обработки сигналов при импульсном ультразвуковом виброконтроле» (USVIBSIM, язык программирования – C#), на которую получено свидетельство о государственной регистрации.

Проанализированы пределы применимости и погрешности предлагаемой методики для динамических (скорость и ускорение поверхности) и кинематических измерений.

Для реализации системы вибродиагностики электрооборудования с бесконтактным виброконтролем на основе модифицированного УЗ фазового метода (рисунок 1) были разработаны и программно-аппаратно реализованы макетные варианты всех необходимых узлов.

Функциональная схема узла импульсного УЗ контроля показана на рисунке 1 в составе комплексной системы виброконтроля. На рисунке 8 приведены временные диаграммы работы узла.

Генератор импульсов ГИ формирует сигнал тактовой частоты 40 кГц (рисунок 1 и 8 – Сиг.1). С появлением импульса СТАРТ (Сиг.2) в блоке управления БУ формирователь импульсов последовательности ФИП начинает генерировать последовательность импульсов (Сиг.3). Последовательность формируется в блоке задания последовательности БЗП.

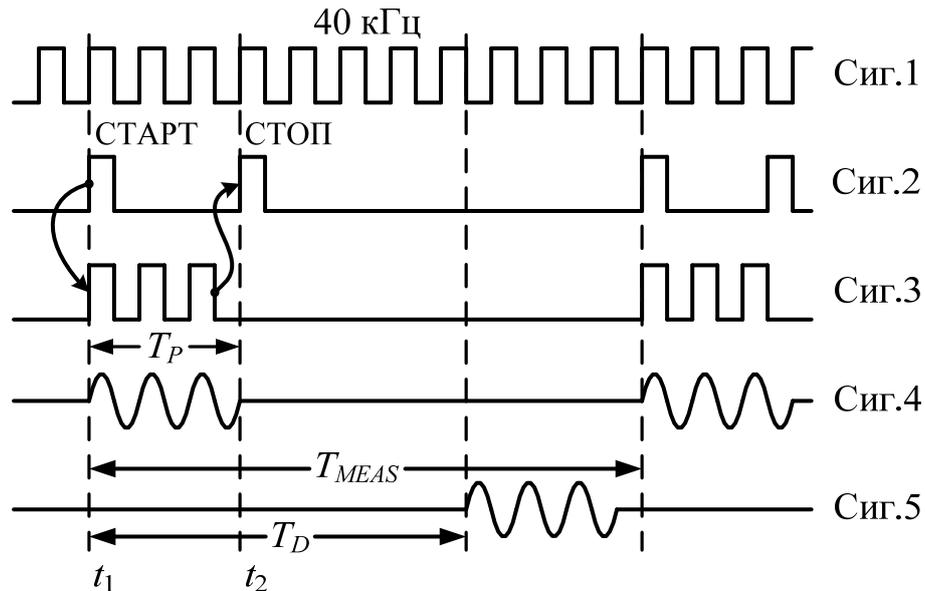


Рисунок 8 – Временные диаграммы работы узла бесконтактных УЗ измерений системы виброконтроля

Пакеты импульсов могут преобразовываться по коду Баркера. Процесс выдачи завершается с появлением импульса СТОП (Сиг.2) от блока управления БУ. Длительность пакетов и частота настраивается в БУ (по умолчанию $T_P = 1$ мс и $T_{MEAS} = 0,5$ сек – см. рисунок 8). УЗП управляется электронным ключом ЭК в соответствии с генерируемой последовательностью (Сиг.4).

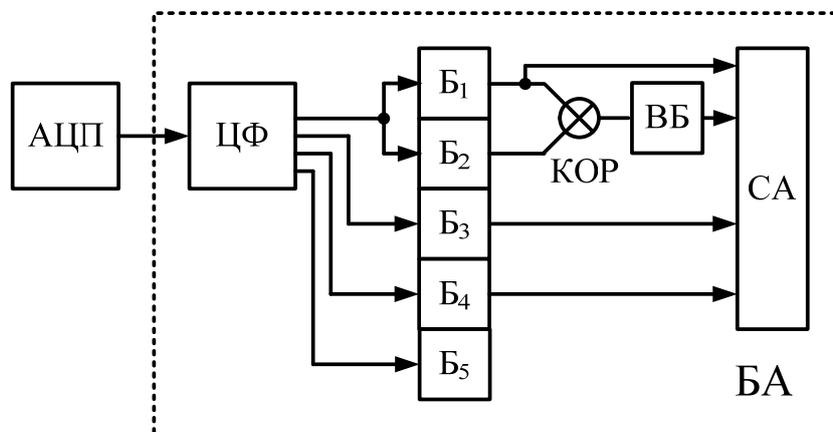


Рисунок 9 – Блок анализатора

В зависимости от расстояния до объекта контроля УЗ волна доходит до приемника (Сиг.5) за время задержки T_D . Сигнал с фильтра промышленных

помех ФПП идет на усилитель напряжения УН, а после передается в АЦП и далее в блок анализатора БА.

На рисунке 9 представлен блок анализатора БА, в котором собирается вся информация с датчиков. Значения приёмного УЗ сигнала помещаются в буфер B_1 . Содержимое буфера B_2 используется в качестве образца – сигнала эталона – для дальнейшего вычисления ВКФ. Содержимое буферов перемножаются в блоке коррелятора КОР. В блоке, производящем вычисления ВБ, определяется мощность ВКФ, после чего производится вычисление средневзвешенного положения. В буферах B_3 и B_4 хранятся сигналы с ПД. Заключительный этап вычислений состоит в анализе полученных данных.

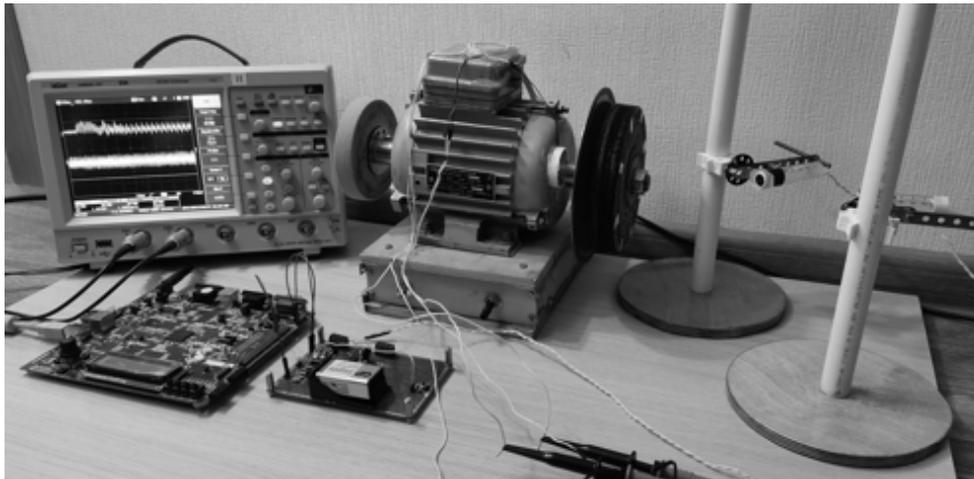


Рисунок 10 – Общий вид лабораторной установки для контроля вибраций асинхронного электродвигателя

В качестве излучателя / приемника ультразвука использованы преобразователи Murata MA40S4S / MA40S4R с резонансной частотой 40 кГц. Датчики имеют большую ширину диаграммы направленности (ДН) (до 60°). На границах ДН интенсивность излучения меньше максимального значения примерно на 5-10 дБ. Потери системы излучатель-приемник на двойное преобразование (сигнал-звук-сигнал) на расстоянии 5-10 см при отражении составляют 20-30 дБ. На рисунке 10 показан общий вид лабораторной установки для контроля вибраций асинхронного электродвигателя.

В четвертой главе диссертационной работы описана и экспериментально показана работа системы виброконтроля с активным УЗ зондированием.

Для экспериментального анализа вибраций на низких частотах была собрана лабораторная установка на основе кривошипно-шатунного механизма, схематичное изображение которой представлено на рисунке 11. В установке использовался малооборотный двигатель ДСР-4/60, имелась возможность изменения амплитуды хода кривошипа путем изменения радиуса точки крепления на колесе.

Оценка частоты и амплитуды колебаний поверхности производилась по анализу средневзвешенного положения «центра тяжести» (ЦТ) мощности корреляционной функции по формуле (3).

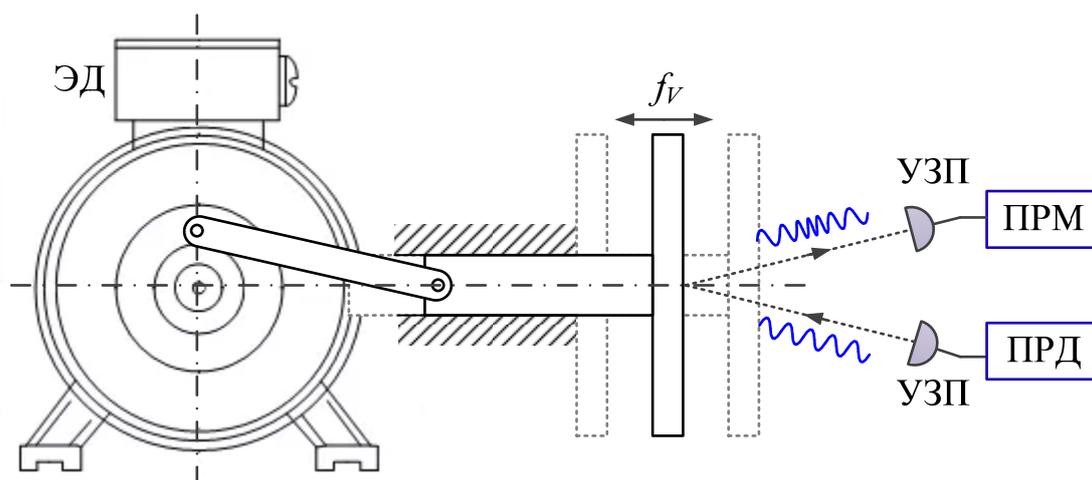


Рисунок 11 – Схема лабораторной установки при контроле НЧ вибраций

На рисунке 12 *а* показаны примеры экспериментальной (сплошная линия) и теоретической (пунктир) зависимости средневзвешенного положения мощности ВКФ. Частота колебаний отражающей поверхности при амплитуде 9 мм составляла примерно 0,5 Гц и являлась величиной непостоянной. На рисунке 12 *б* представлены спектры этих зависимостей, из которых видно наличие двух пиков на частотах $\sim 0,43$ и $\sim 0,49$ Гц. При этом учитывалось, что амплитуда, частота и фаза носили переменный характер. В качестве примера на рисунке 12 *в* показан результат аппроксимации фазы соответствующей рисунку 12 *а*.

Спектральный анализ в данном случае затрудняется тем, что частота дискретизации такого сигнала определяется частотой зондирующих импульсов (порядка 3-4 отсчетов на один период колебаний). Данное ограничение связано с длительностью записи, обработки сигналов и расчета временной задержки положения ЦТ. Максимальное отклонение экспериментально измеренного значения частоты от теоретически рассчитанного составляет $\sim 4\%$ (рисунок 12 *б*).

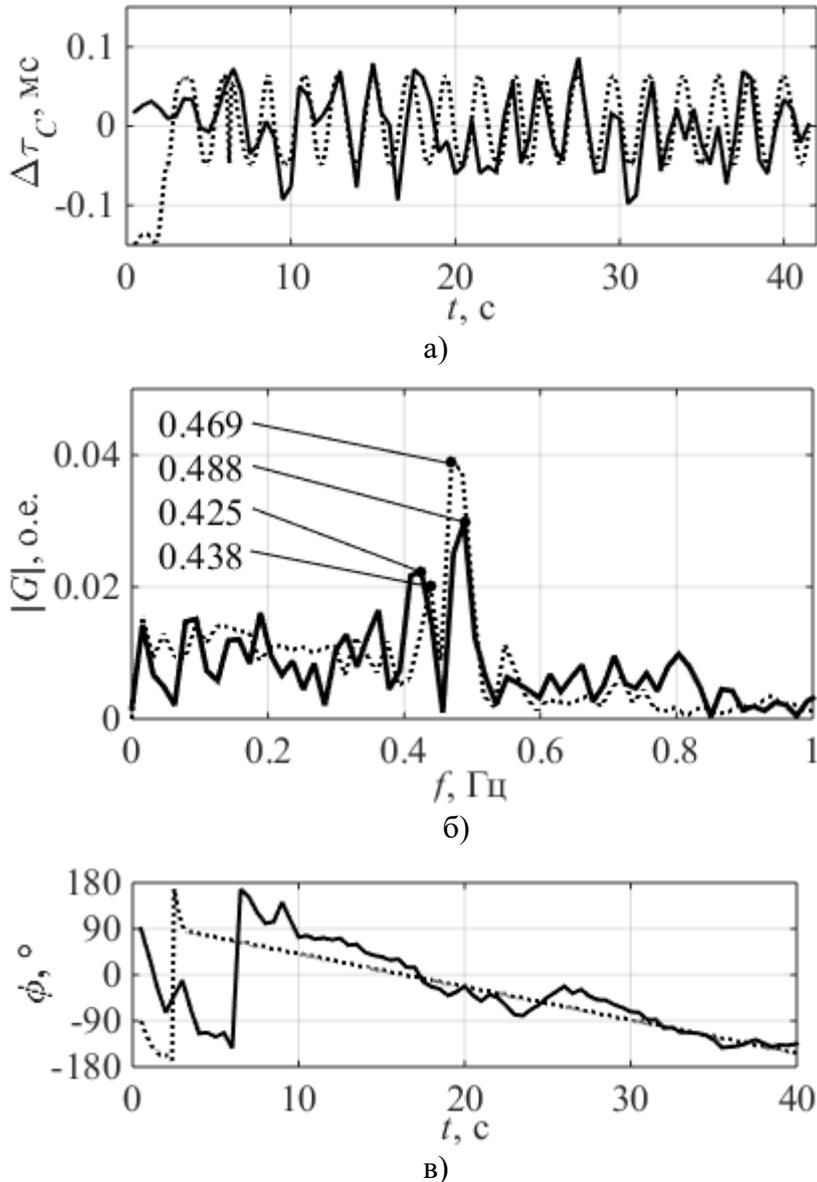
Для системы виброконтроля ЭД, показанной на рисунке 1 проанализированы режимы работы ЭД в исправном состоянии и при наличии разбалансировки. При наличии разбаланса амплитуда вибраций увеличивается, как в вибросигналах с ПД, так и в УЗ вибросигналах.

Проанализированы процессы пуска ЭД (рисунки 13, 14). Рассмотрен «срез» всей информации, получаемой в комплексе с датчиков системы виброконтроля:

- вибросигналы, полученные с ПД;
- вибросигналы, полученные с УЗП;
- сигнал частоты вращения с ЦЛТ.

На рисунках 13 и 14 приведены зависимости изменения частоты вибраций от времени и зависимости величины максимума амплитудного спектра при пуске ЭД (амплитуда вибраций на основной частоте). Переходный режим проявляется во всех случаях по-разному: разное время переходного процесса, разная форма зависимостей изменения частоты. Время нарастания частоты

вибраций от начального до установившегося значения, измеренное контактными датчиками составляет порядка 400 мс (кривые 1 и 2, рисунок 13 а). Измерения при помощи УЗП дают значение больше 500 мс (кривые 3 и 4, рисунок 13 б).

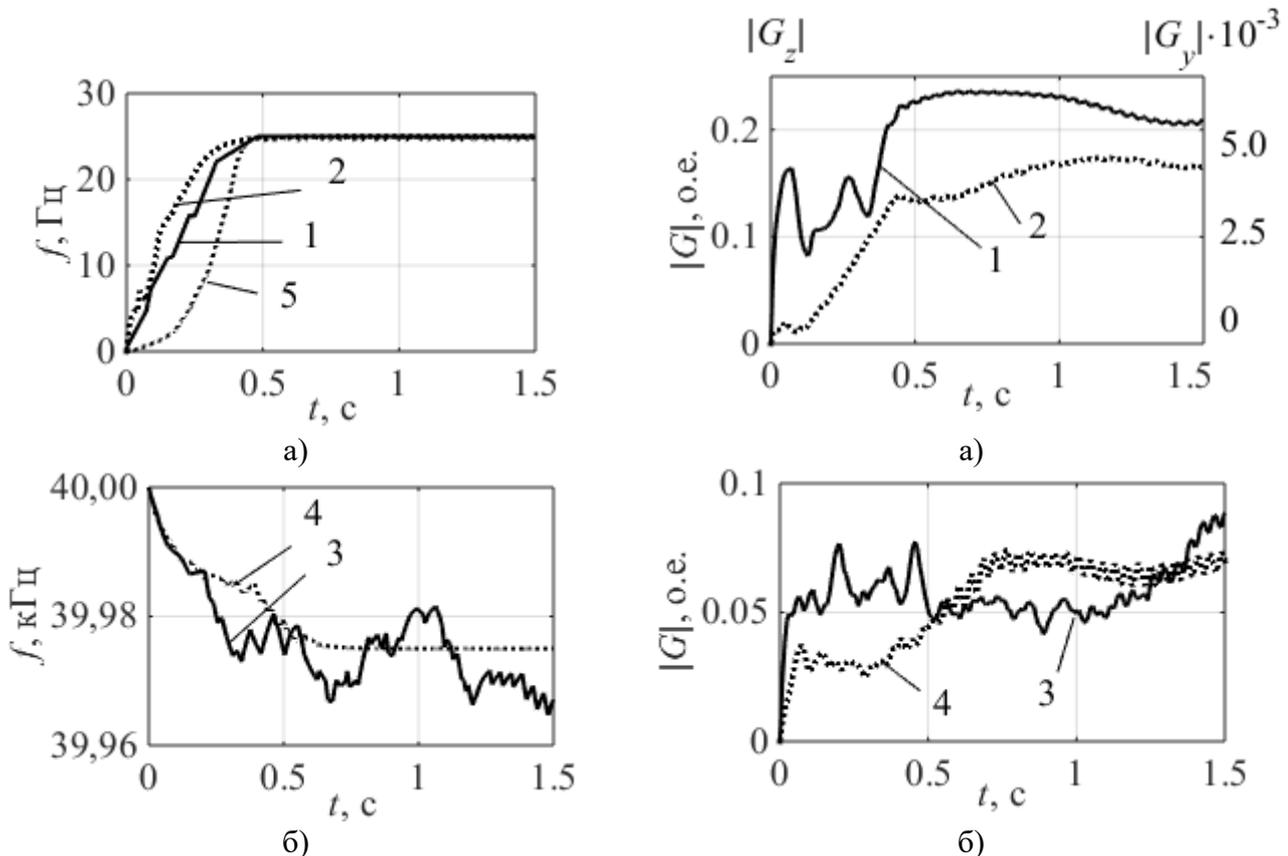


а) график положения ЦТ мощности ВКФ; б) амплитудные спектры;
 в) фазовый угол положения ЦТ мощности ВКФ

Рисунок 12 – Экспериментальный (сплошная линия) и теоретический (пунктир) графики, полученные при УЗ контроле НЧ вибраций. Частота вибраций ~ 0,43-0,49 Гц

В осевом направлении (z) видны значительные колебания частоты (кривая 3). Информация, получаемая разными способами, различна и может дополнять друг друга. Более того, при сравнении вибросигналов с сигналом тахометра (кривая 5), обнаруживается, что в разгонном режиме электродвигателя динамика изменения скорости вращения вала двигателя, изменения частоты и амплитуды вибраций в направлении оси вала (z) и в перпендикулярном направлении (y) существенно отличаются.

На рисунке 14 а (кривые 1 и 2) показано изменение амплитуды спектров вибросигналов с контактных датчиков в двух направлениях. На рисунке обозначены две вертикальных оси: слева – для кривой 1, справа – для кривой 2. Из графиков видно значительное различие в амплитуде вибраций в разных направлениях. Таким образом, отклонение инерционной нагрузки (маховика) от плоскости вращения приводит к существенно более значительным вибрациям корпуса в направлении оси вала (z), чем в перпендикулярном направлении (y).



На рисунках: 1 – ПД в осевом направлении (z); 2 – ПД в вертикальном направлении (y);
3 – УЗП в осевом направлении (z); 4 – УЗП в вертикальном направлении (y);
5 – показания ЦЛТ

а) ПД и ЦЛТ; б) УЗП

а) ПД (для кривой 1 вертикальная ось слева, для кривой 2 – справа); б) УЗП

Рисунок 13 – Временные зависимости изменения частоты

Рисунок 14 – Временные зависимости изменения амплитуды спектра

Для УЗ (бесконтактных) вибросигналов амплитуда вибраций проявляется в глубине фазовой модуляции сигнала, слабо влияет на его амплитуду, поэтому, независимо от амплитуды вибраций, уровень регистрируемых УЗ сигналов для любых направлений измерения примерно одинаковый, что не требует дополнительных схемных решений для учета различных диапазонов измеряемых амплитуд колебаний поверхности объекта. Анализ спектров УЗ вибросигналов показывает, что если амплитуда вибраций вращающегося маховика в направлении вдоль оси вала (z) и в перпендикулярном направлении (y) сопоставимы, то амплитуда вибраций корпуса отличается более, чем на

порядок. То есть вибрации вала могут передаваться на корпус со значительным ослаблением, а дистанционные измерения непосредственно на вращающихся элементах ЭД, в этом отношении, имеют преимущества.

Длительность переходного процесса нарастания частоты вибраций (кривые 1, 2, 4, рисунок 13) при контактных измерениях и УЗ измерениях отличаются более чем на 20 %. Необходимо отметить, что в осевом направлении имеют место сильные колебания даже в установившемся режиме работы электродвигателя (кривая 3, рисунок 13 б). Это не проявляется при контактных измерениях вибраций корпуса. Частота вибраций вала с нагрузкой выходит на стационарный режим, соответствующей скорости вращения, значительно медленнее, чем частота вибраций корпуса ЭД. То есть при ультразвуковом бесконтактном виброконтроле обнаруживаются явления медленного изменения амплитуды проекции вибраций на направление рассеяния УЗ, связанные с прецессией вала.

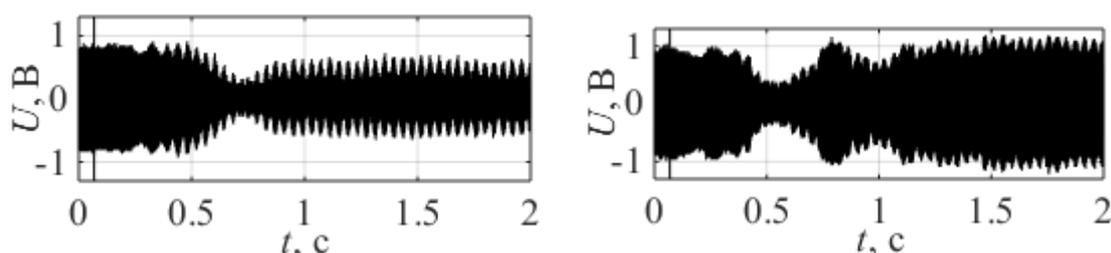


Рисунок 15 – УЗ вибросигналы перпендикулярных направлений в плоскости вращения

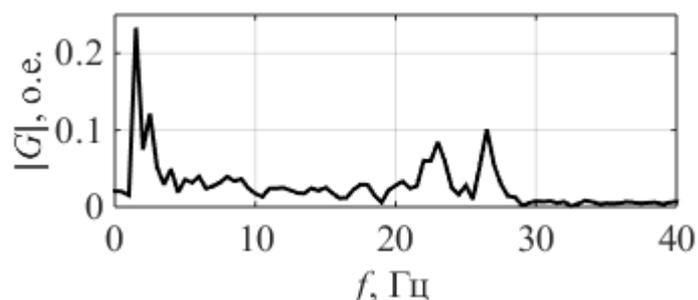


Рисунок 16 – Спектр УЗ сигнала после гетеродинирования

Для анализа этого явления регистрировались соответствующие вибросигналы и строились годографы в плоскости вращения. Для примера на рисунке 15 приведены такие сигналы. Кроме фазовой модуляции, сигналы имеют также явную амплитудную модуляцию. Спектры таких сигналов имеют характерный пик на частоте 40 кГц, частоте УЗ волны, и боковые пики на частотах, отстоящих от основного пика на расстоянии, равном частоте вибраций.

Низкочастотная модуляция УЗ вибросигнала имеет частоты в единицы герц. Ее анализ может проводиться после высокочастотной фильтрации, по огибающей вибросигналов (см. рисунок 14 б) или при использовании гетеродинной схемы, когда через промежуточную частоту 40 кГц выделяется

низкочастотная часть спектра вибросигнала. На рисунке 16 представлен спектр сигнала, обработанного по гетеродинному алгоритму. В спектре имеются пики в области 25 Гц – частота вибраций, и пик в области 1-2 Гц. Ниже, на рисунке 17 изображены годографы, построенные по таким сигналам (переходный процесс).

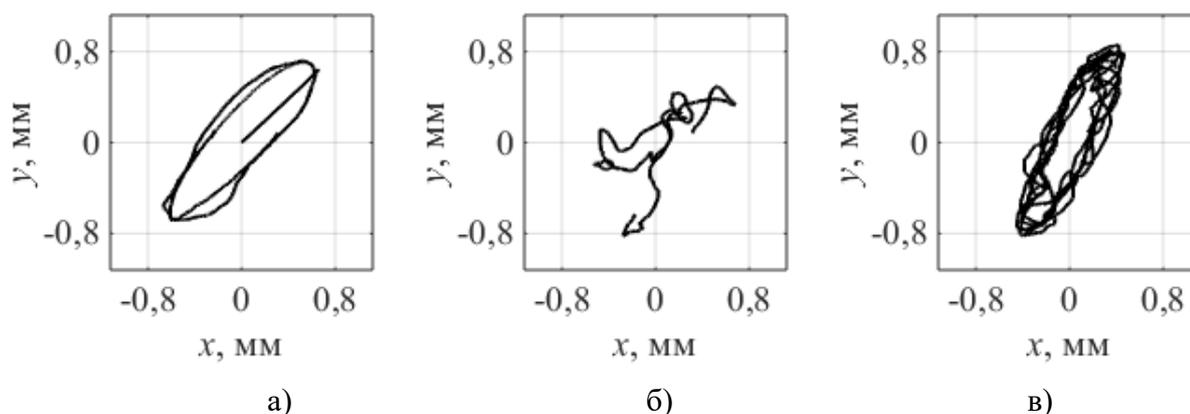


Рисунок 17 – Годографы в плоскости вращения

Из годографа видно, что при пуске электродвигателя имеет место эллипсообразная форма (рисунок 17 а). Далее в переходном режиме начинают появляться значительные вибрации вала ЭД, что приводит к искажению формы годографа (рисунок 17 б). При выходе на установившийся режим (рисунок 17 в) годограф снова приобретает форму эллипса с наложением составляющей 25 Гц, соответствующей вибрациям на основной оборотной частоте ЭД. В данном случае под пуском и выходом в установившийся режим понимается длительный процесс, отличный от процессов рисунках 13 и 14 (кривые 1, 2, 5). Таким образом, УЗ измерения вибраций непосредственно на подвижных элементах позволяют получать информацию о частоте низкочастотных колебаний. Наличие такой НЧ модуляции УЗ сигнала, является следствием прецессии вала. Это расширяет диагностические возможности виброконтроля.

Таким образом, использование в системе виброконтроля ЭД с УЗ зондированием комплексного анализа всей имеющейся информации позволяет сопоставить параметры вибраций подвижных и неподвижных частей электрооборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дистанционные активные ультразвуковые методы виброконтроля являются относительно доступными и могут составлять конкуренцию оптическим методам в системах вибрационной диагностики электрооборудования. При этом они дают возможность измерения вибраций подвижных элементов оборудования, где использование традиционных контактных методов вызывает затруднения. При разработке системы вибрационного контроля с использованием активного ультразвукового зондирования в работе получены следующие основные результаты:

1. Предложен модифицированный бесконтактный УЗ фазовый метод виброконтроля, основанный на активном импульсном зондировании вибрирующих поверхностей. Он основан на применении линейной частотной модуляции и фазовой манипуляции сигналов, их корреляционной обработки с вычислением средневзвешенного временного положения мощности взаимной корреляционной функции. Метод позволяет осуществлять бесконтактный контроль вибраций в широком диапазоне частот от долей герца до десятков килогерц, поскольку может быть адаптирован как к кинематическим, так и к динамическим измерениям.

2. Проведено моделирование различных схем импульсных ультразвуковых измерений в системе виброконтроля электрооборудования. Показано, что при высокой и средней частоте вибраций (от десятков герц до единиц килогерц) эффективным является использование ЛЧМ ультразвуковых сигналов с их корреляционной обработкой для контроля скорости и ускорения вибрирующей поверхности в рамках динамического принципа измерений. Для низкочастотных вибраций показана возможность контроля перемещения поверхности (кинематический принцип) с потенциальным использованием фазовой манипуляции зондирующих сигналов по коду Баркера.

Предложено использование аппарата ИНС для обработки УЗ вибросигналов. Показано, что ИНС позволяют определять параметры вибраций высокой частоты за временной интервал, соответствующий нескольким периодам несущей частоты УЗ сигнала. Для вибраций низкой частоты использование ИНС дает возможность проводить их контроль при низкой частоте зондирующих импульсов.

Алгоритм моделирования распространения и отражения ультразвуковых волн от вибрирующей поверхности, соответствующей обработке сигналов реализован в программе, зарегистрированной в Реестре программ для ЭВМ, отображающей результаты в графическом виде.

Результаты моделирования демонстрируют адаптивность предлагаемых алгоритмов к условиям измерений.

3. Разработаны схемы всех узлов системы виброконтроля электродвигателя с активным УЗ зондированием. Система собрана в виде лабораторной установки, где объектом контроля является асинхронный электродвигатель с маховиком. Разработана программа (на языке схемного проектирования VHDL) для генерации и излучения УЗ импульсов для микросхемы FPGA XC3S500E, входящей в состав серии модулей Xilinx Spartan-3E.

4. Произведена экспериментальная проверка функционирования системы виброконтроля на основе бесконтактных измерений. Предложенная методика практически не имеет ограничений по частоте в низкочастотной области вибраций. Погрешности измерений нестационарной частоты по предложенной методике при минимально возможной дискретизации составляют ~4 %.

Выявлены значительные расхождения в форме вибросигналов, полученных контактными и бесконтактными методами контроля. Показано, что

вибросигналы, полученные разными способами, содержат в себе разную информацию. Одновременное использование обобщенной информации со всех датчиков (контактных и ультразвуковых) позволяет сопоставить параметры вибраций подвижных и неподвижных частей электрооборудования.

Измерения вибраций на вращающихся элементах ЭД дают более полную информацию о его разбалансировке. Обнаружены значительные отличия в динамике изменения вибраций подвижных и неподвижных частей электрооборудования. Показано, что бесконтактный УЗ контроль дает возможность оценить частотные показатели плавных НЧ колебаний, которые являются следствием таких эффектов, как прецессия вала двигателя, а также степень и скорость передачи колебаний от вала к корпусу двигателя в переходных режимах.

Практические рекомендации и перспективы дальнейших исследований.

Предлагаемая система виброконтроля с активным ультразвуковым зондированием потенциально повышает возможности вибродиагностики электрооборудования. Результаты имеют перспективы использования для виброконтроля электрооборудования электросетевого комплекса РФ.

Дальнейшие исследования предполагают оптимизацию характеристик и параметров программно-аппаратного обеспечения системы вибродиагностики для практического применения.

Долгосрочная перспектива предполагает классификацию типовых неисправностей по параметрам УЗ вибросигналов и типовых способов размещения УЗП в системе.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, включенных в перечень ВАК:

1. *Бычков, А.В.* Возможности корреляционной обработки импульсных ультразвуковых сигналов при бесконтактном виброконтроле оборудования электроэнергетики / А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 3. – С. 24-32. (0,73 п.л./0,36 п.л.)

2. *Бычков, А.В.* Корреляционная обработка сигналов для уменьшения погрешности импульсных ультразвуковых измерений / И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков, Л.Н. Васильева, Б.М. Гильденберг, В.И. Горбунов // Вестник Чувашского университета. – 2018. – №3 – С. 163-171. (0,73 п.л./0,15 п.л.)

3. *Бычков, А.В.* Цифровая фазовая модуляция и корреляционная обработка ультразвуковых сигналов для импульсных измерений в неоднородной среде / И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – №3 – С. 114-119. [DOI: 10.7868/S0032816218030072] (0,74 п.л./0,24 п.л.)

4. *Бычков, А.В.* Нейроалгоритм для оценки частоты вибраций электрооборудования при дистанционном ультразвуковом контроле / А.В. Бычков, П.Н. Федорова, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 67-77. (0,89 п.л./0,29 п.л.)

5. *Бычков, А.В.* Использование нейронной сети для определения глубины и частоты модуляции сигнала при ультразвуковом виброконтроле электрооборудования / А.В. Бычков, И.Ю. Бычкова, Н.Н. Сулова, К.К. Алимов // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 21-30. (0,81 п.л./0,21 п.л.)

6. *Бычков, А.В.* Система виброконтроля электродвигателя с активным ультразвуковым зондированием / А.В. Бычков // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 1. – С. 34-43. (0,81 п.л.)

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus/WoS:

7. *Bychkov, A.* Active Ultrasonic Vibration Control of Electrical Equipment: Correlation Signal Processing / A. Bychkov, I. Bychkova, L. Slavutskii // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Chelyabinsk: 2019. – P. 244-248. [DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877666] (0,61 п.л./0,2 п.л.)

8. *Bychkov, A.* Neural network for pulsed ultrasonic vibration control of electrical equipment / A. Bychkov, L. Slavutskii, E. Slavutskaya // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Chelyabinsk: 2020. – P. 24-28. [DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216248] (0,61 п.л./0,2 п.л.)

Объекты интеллектуальной собственности:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666569. Программа моделирования и цифровой обработки сигналов при импульсном ультразвуковом виброконтроле : № 2021665777 ; заявлено 08.10.2021 ; опубликовано 15.10.2021 / Бычков А.В., Бычкова И.Ю., Славутский Л.А. ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова». – 8,09 Мб. – Текст : электронный // Федеральный институт промышленной собственности : [сайт]. – URL: <https://new.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/021/666/569/2021666569-00001/document.pdf> (дата обращения: 21.03.2022). (1 с / 0,3 с)

Материалы докладов:

10. *Бычков, А.В.* Увеличение временного разрешения импульсного ультразвукового контроля с помощью корреляционной обработки сигналов / И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции (Чебоксары, 1-3 июня 2017 г). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 44-48. (0,29 п.л./ 0,15 п.л.)

11. *Бычков, А.В.* Обработка импульсных ультразвуковых сигналов при активном виброконтроле оборудования электроэнергетики / А.В. Бычков // САПР и моделирование в современной электронике. Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции. (Брянск, 24-25 октября

2018 г.) / Под редакцией Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2018. – Ч. 1 – С. 127-130. (0,23 п.л.)

12. *Бычков, А.В.* Бесконтактный ультразвуковой контроль: цифровое формирование и обработка сигналов / И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Международная научная конференция «Нигматуллинские чтения-2018» (Казань, 9-12 октября 2018 г.). – Казань: Изд-во АН РТ, 2018. – Т. 1. – С. 191-194. (0,47 п.л./0,15 п.л.)

13. *Бычков, А.В.* Низкочастотные вибрации электрооборудования: ультразвуковой импульсный контроль / А.В. Бычков // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы XIII всероссийской научно-технической конференции (Чебоксары, 7 июня 2019 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 58-62. (0,29 п.л.)

14. *Бычков, А.В.* Вибрации в разных диапазонах частот: особенности активного ультразвукового контроля / А.В. Бычков, В.Г. Григорьев // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции (Чебоксары, 5 июня 2020 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – С. 69-72. (0,23 п.л./0,12 п.л.)

БЫЧКОВ Анатолий Владимирович

СИСТЕМА АКТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ВИБРОКОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 24.05.2022. Формат 60×84 1/16.

Печать оперативная. Печ. л. 1,5. Бумага офсетная.

Тираж 100 экз. Заказ № 632.

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015 Чебоксары, Московский просп., д.15

