

Баранов Константин Денисович, аспирант,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ВИБРОДИАГНОСТИКА ЛОПАТОК РОТОРА ТУРБИНЫ

Аннотация. Радиолокационная вибродиагностика обеспечивает бесконтактный контроль колебаний лопаток ротора турбины по фазе отраженного сигнала и микродоплеровским компонентам. Рассмотрены режимы зондирования и обработки сигнала для определения микроперемещений. Также выделены признаки дефектов. Показана необходимость привязки диагностики к режиму вращения ротора.

Ключевые слова: Радиолокационная вибродиагностика; микродоплеровский эффект; CW-радар; FMCW-радар; лопатки турбины; собственные частоты.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность лопаточного аппарата напрямую влияет на ресурс и безопасность газотурбинной установки. Дефекты пера и замковой зоны изменяют динамические характеристики лопатки (массу, жесткость, демпфирование), что проявляется в смещении собственных частот и изменении форм колебаний. При этом собственные частоты исправной лопатки зависят от режима из-за «жесткостного эффекта вращения»: рост частоты вращения приводит к росту эффективной жесткости и повышению частот [4,5].

Классический контроль вибрации лопаток включает тензометрирование (высокая точность, но сложность и инвазивность), оптические методы (ограничения по загрязнению/условиям), а также методы с радиоволновыми датчиками в корпусе. Для промышленной эксплуатации интерес представляет радиоволновой подход: он потенциально неинвазивен, допускает установку датчика в корпусе, может работать в агрессивных условиях, а в миллиметровом диапазоне способен измерять микроперемещения за счет высокой чувствительности фазовых методов [4,6].

Для контекста режимов отметим, что для промышленных ГТУ типичны скорости вращения порядка нескольких тысяч об/мин. Это задает характерные частоты возбуждения (порядки вращения (вибрации кратные частоте вращения), лопаточная частота и ее гармоники), на фоне которых необходимо выделять признаки лопаточных колебаний.

1. Физические основы радиолокационного измерения вибрации

1.1. Фазовый принцип (интерферометрия)

В моностатическом радаре изменение расстояния до отражающей точки $x(t)$ приводит к изменению фазы отраженного сигнала [2]:

$$\Delta\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} * x(t) \quad (1)$$

Где λ – длина волны.

Это ключевой механизм измерения малых перемещений: даже микрометровые смещения дают заметные фазовые изменения на С/Х/К-диапазонах и особенно в миллиметровом диапазоне. Общие соотношения и интерпретация фазовых сдвигов для малых колебаний широко используются в радиолокационном мониторинге вибраций [2].

1.2. Микродоплеровский эффект

Если объект совершает микродвижения (вибрации/колебания/вращение отдельных элементов), в спектре появляются микродоплеровские компоненты – боковые полосы и характерные «подписи», связанные с частотой и амплитудой микродвижений. Микродоплер



рассматривается как универсальный механизм для анализа вращающихся и вибрирующих элементов, включая лопасти/лопатки [3].

2. Режимы зондирования и их применимость к лопаткам

2.1. Непрерывноволновой радар (CW)

CW-радар хорошо подходит для высокоточного измерения виброперемещений по фазе, но имеет ограниченную дальностную селективность: отражения от корпуса/экранирующих элементов могут доминировать. Поэтому CW рационален, когда геометрия обеспечивает устойчивое доминирование отражения от зоны интереса (например, при «взгляде» на периферию колеса через окно/канал). Практические подходы к измерению структурных перемещений CW-радаром описаны в работах по радиолокационной интерферометрии и структурному мониторингу [1].

2.2. Частотно-модулированный непрерывный сигнал (FMCW)

При частотно-модулированном непрерывном зондировании излучаемый сигнал плавно изменяет частоту во времени. Сравнение принятого отражения с текущим излучаемым сигналом дает разностную частоту, которая однозначно связана с задержкой прохождения и, следовательно, с расстоянием до отражающего участка. Благодаря этому становится возможным выделить отражения от заданной зоны (например, области концов лопаток) и подавить вклад от неподвижных элементов проточного тракта.

Для вибродиагностики затем используют фазу комплексного сигнала, соответствующего выбранному диапазону расстояний: по ее изменениям восстанавливают малые перемещения лопатки и строят спектральные признаки (частоты, гармоники, боковые составляющие), связанные с ее колебаниями [1,2].

2.3. Импульсный режим

Импульсные радары также обеспечивают дальностную селективность, но при высоких требованиях к частоте дискретизации/полосе и сложной аппаратуре. В практике турбомашин чаще встречаются решения на CW/FMCW как компромисс между чувствительностью, стоимостью и интеграцией [1].

3. Извлечение вибрации лопаток из радарного сигнала

3.1. I/Q-демодуляция и определение перемещения

Стандартный тракт малых перемещений: получение комплексного базового сигнала $I(t) + jQ(t) \rightarrow$ оценка фазы $\varphi(t) = \text{atan2}(Q, I) \rightarrow$ развертка фазы $\rightarrow$ пересчет в перемещение $x(t) = \lambda \Delta\varphi(t) / (4\pi)$. Типовые проблемы – фазовые скачки, шум, а также наложение вкладов от нескольких отражателей, попадающих в один и тот же интервал расстояний (в одну ячейку по дальности). В этом случае измеряемая фаза и амплитуда являются результатом суммарного отражения и могут искажать оценку перемещения лопаток; поэтому важно выбирать интервал расстояний так, чтобы в нем доминировало отражение от контролируемой области [2].

3.2. Спектральный анализ и порядковый анализ

Для ротора ключевые частоты удобно рассматривать в «порядках», нормированных на частоту вращения $f_{\text{вращ}}$. Диагностически важны:

- 1х (основной порядок вращения);
- лопаточная частота $F_{\text{лоп}} = N_{\text{лоп}} \cdot f_{\text{вращ}}$ (где $N_{\text{лоп}}$ – число лопаток);
- боковые полосы вокруг $F_{\text{лоп}}$ и гармоник при модуляции амплитуды/фазы, а также линии собственных мод лопатки, если колебания возбуждаются аэродинамикой/неуравновешенностью/зацеплением.

Для турбинных и компрессорных ступеней частоты вращения – тысячи об/мин. Это означает десятки–сотни герц для $f_{\text{вращ}}$ и килогерцы для $F_{\text{лоп}}$ (в зависимости от $N_{\text{лоп}}$), что предъявляет требования к полосе и частоте дискретизации радара [4,5].



3.3. Метод измерения времени прохождения концов лопаток

На практике применяется метод измерения времени прохождения концов лопаток: датчик на корпусе фиксирует момент прохождения каждой лопатки, а по отклонению этих моментов относительно опорного положения оценивают колебания лопаток. Реализации метода возможны на радиоволновых датчиках. Радиоволновые датчики также применяются для контроля зазора и колебаний на вращающихся элементах турбомашин. В этом смысле радиолокационная вибродиагностика развивает данные подходы: от точечного измерения времени прохождения – к вычислению непрерывного временного ряда перемещений и анализу микродоплеровских признаков [6].

4. Диагностические признаки для лопаток турбины

4.1. Сдвиг собственных частот и режимная зависимость

Ключевой класс признаков – изменение собственных частот колебаний лопатки. Согласно технической справке из источника [4], подчеркивается, что:

- дефекты (трещины, перегрев, износ, сколы) способны заметно менять собственные частоты [4];
- собственные частоты зависят от режима из-за центробежного «распрямления» и роста жесткости при увеличении оборотов [5].

Практическое следствие для радара: частотный контроль должен выполняться с привязкой к режиму работы (как минимум к $f_{\text{вращ}}$ и температурно-нагрузочным условиям), иначе можно перепутать дефект со штатной режимной перестройкой.

Чтобы отделить собственные колебания лопатки от вынужденных составляющих, связанных с вращением и прохождением лопаток, применяют порядковый анализ: вынужденные компоненты формируют линии, «привязанные» к частоте вращения и частоте прохождения лопаток (и их кратным), то есть изменяются пропорционально оборотам. Собственные моды проявляются как устойчивые пики, которые сохраняются как отдельные линии в спектре и особенно отчетливо выделяются при проходе режимов, близких к резонансным (при разгоне/выбеге), когда их амплитуда резко возрастает [4,5].

4.2. Рост амплитуды на резонансах и изменение демпфирования

Даже без точного знания абсолютных частот, диагностически важны:

- появление/рост узких линий в спектре перемещений, соответствующих модам лопатки;
- рост амплитуды на определенных порядках при изменении режима;
- изменение ширины пика (эффективного демпфирования), что может указывать на трещины или деградацию контактов/бандажей.

Признаком резонансного вовлечения собственной моды является характерный максимум амплитуды в узком частотном диапазоне при изменении оборотов, а также изменение «остроты» пика (эффективного демпфирования). Поэтому информативно анализировать не только спектр на одном режиме, но и карту спектра по режимам: вынужденные линии следуют за оборотами, а резонансные проявления собственных мод выделяются локальным усилением вблизи соответствующей частоты [4].

4.3. Боковые составляющие вокруг лопаточной частоты и характерные признаки амплитудной перестройки

При дефектах пера или замковой части часто усиливается нелинейность колебаний и возникает периодическая перестройка амплитуды. В результате в спектре рядом с лопаточной частотой (частотой прохождения лопаток) и её кратными появляются боковые составляющие, расположенные на расстоянии, равном частоте этой перестройки (например, собственной частоте одной из форм колебаний или частоте внешнего возбуждения). Анализ доплеровских



составляющих, обусловленных микроколебаниями, позволяет выявлять такие характерные изменения и использовать их как диагностические признаки [3,4].

4.4. Признаки, связанные с геометрией (зазор/биение)

Радиоволновые датчики в турбомашинах применяются также для измерения зазора на периферии и могут дополнять вибропризнаки информацией о:

- терморасширении, деформации корпуса, дисбалансе ротора;
- биении/смещении ротора относительно корпуса.

Такие измерения демонстрировались для микроволновых датчиков на экспериментальных установках применяются ограниченно [6].

5. Практические аспекты внедрения на турбине

5.1. Размещение датчика и область зондирования

Главная инженерная сложность – обеспечить устойчивое отражение от области лопаток при минимальном влиянии корпуса. Для этого применяют:

- выбор точки установки на корпусе (по возможности ближе к периферии колеса);
- выбор направления антенны так, чтобы основное излучение приходилось на область концов лопаток и меньше захватывало неподвижные элементы;
- при частотно-модулированном непрерывном зондировании – выделение интервала расстояний (окна по дальности), соответствующего лопаткам, что позволяет подавить стационарные отражения от корпуса и крепежа.

5.2. Температура, вибрация корпуса, загрязнение

Преимущество радиоволнового датчика – устойчивость к запылению и отсутствие требования оптической чистоты (в отличие от оптики). Однако остаются задачи термозащиты, электромагнитной совместимости и механической развязки от вибрации корпуса.

5.3. Калибровка и режимные карты

Так как собственные частоты зависят от оборотов («жесткостный эффект вращения»), для практической диагностики необходимы:

- базовая «карта» частот/амплитуд и режим (обороты/нагрузка);
- допуски на температурные и конструктивные разбросы;
- критерии тревог по отклонению от карты, а не по абсолютному числу.

6. Структура диагностического алгоритма

1. **Привязка к режиму вращения:** определение частоты вращения ротора (по датчику оборотов или по спектру сигнала).

2. **Выделение контролируемого участка:** разделение отражений по расстоянию (при частотно-модулированном непрерывном зондировании) или подавление отражений от корпуса за счет геометрии установки и фильтрации (при непрерывном зондировании).

3. **Вычисление перемещений:** вычисление фазы по квадратурным компонентам → развертка фазы → пересчет в перемещение и фильтрация.

4. **Порядковый и спектральный анализ:** представление спектра в порядках вращения; выделение основной частоты вращения, частоты прохождения лопаток через датчик, собственных мод и боковых составляющих.

5. **Диагностическая оценка:** сравнение с эталонной режимной картой (смещение частот, рост амплитуд, изменение боковых составляющих).

Ниже представлена структурная схема (алгоритм) данной системы.



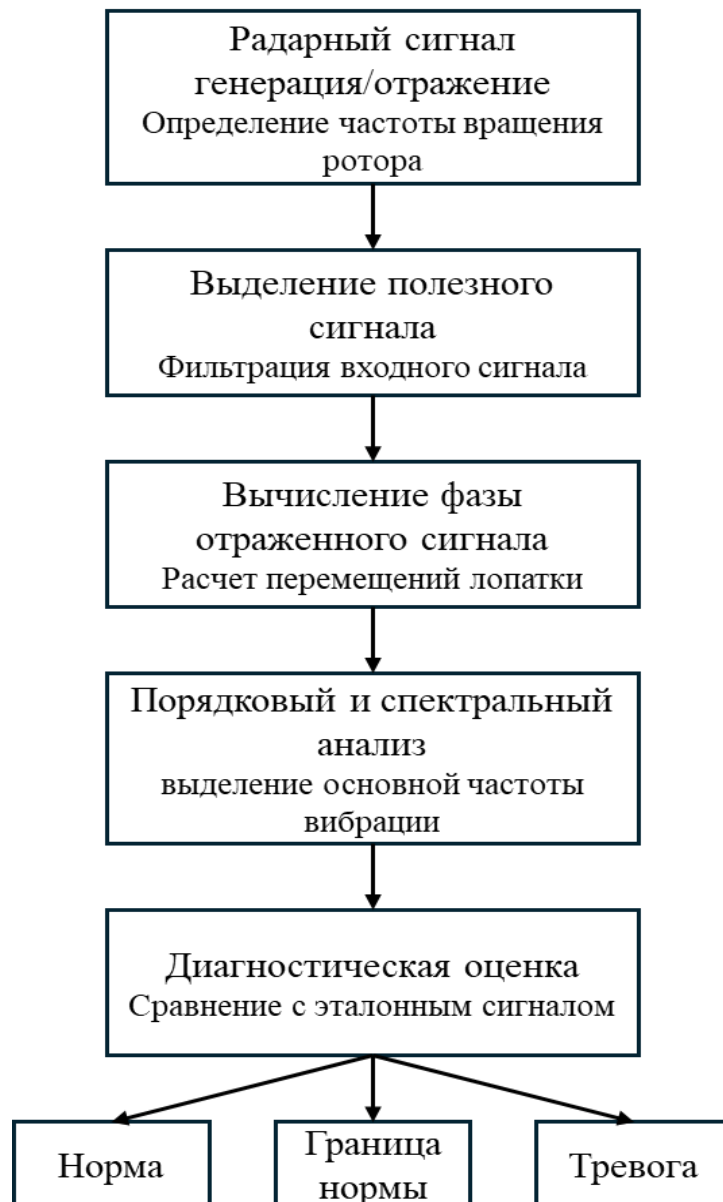


Рисунок 1. Структурная схема диагностики вибрации лопаток

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиоволновая вибродиагностика лопаток ротора турбины основана на высокой чувствительности отраженного сигнала к малым перемещениям: колебания лопаток проявляются изменением фазы и появлением доплеровских составляющих, обусловленных микроколебаниями. На практике наиболее применимы два режима зондирования: непрерывное зондирование обеспечивает простую и высокочувствительную фазовую оценку перемещений, а частотно-модулированное непрерывное зондирование дополнительно позволяет разделять отражения по расстоянию и тем самым уменьшать влияние корпуса и других неподвижных элементов.

Диагностически значимыми признаками являются смещение собственных частот, рост амплитуд резонансных колебаний и появление боковых составляющих около частот прохождения лопаток и ее кратных. Поскольку собственные частоты и уровни колебаний зависят от режима вращения, диагностические решения следует принимать по сравнению с



эталонными режимными зависимостями, а не по одиночным абсолютным значениям. Для повышения достоверности целесообразно совмещать радиоволновые измерения с косвенными параметрами работы и, при необходимости, с методом измерения времени прохождения концов лопаток и контролем зазора.

Список литературы:

1. ИТЦ-М. Виды доплеровских радаров (CW- и FMCW-радары) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itc.by/vidy-doplerovskih-radarov/> (дата обращения: 21.01.2026).
2. Ашряпов М. И. Распознавание жестикуляций человека на основе корреляционной обработки радиолокационных сигналов с применением эталонных масштабирующих функций: текст диссертации [Электронный ресурс]. – М.: Московский авиационный институт, 2024
URL: <https://mai.ru/upload/iblock/20c/2rl8sbawtn83xh3t9cw83czvrtjg172y/Ashryapov-M.I.-tekst-dissertatsii.pdf> (дата обращения: 21.01.2026).
3. Кучерявенко А. В. Модели микродвижений, вызывающих турбовинтовой эффект при обработке радиолокационного сигнала [Электронный ресурс].
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-mikrodivizheniy-vyzyvayuschih-turovintovoy-effekt> (дата обращения: 21.01.2026).
4. ООО НПП «Интерприбор». Диагностика рабочих лопаток турбин по частотам собственных колебаний [Электронный ресурс].
URL: <https://www.interpribor.ru/diagnostics-of-turbine-blades-on-the-natural-frequencies> (дата обращения: 21.01.2026).
5. Моргун С. А. Влияние поля центробежных сил на частоты колебаний рабочих лопаток турбомашин [Электронный ресурс].
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-polya-tsentrobeznyh-sil-na-chastoty-kolebaniy-rabochih-lopatok-turbomashin> (дата обращения: 21.01.2026).
6. Данилин А. И. Дискретно-фазовые преобразователи перемещений для определения параметров колебаний лопаток турбоагрегатов [Электронный ресурс].
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diskretno-fazovye-preobrazovateli-peremescheniy-dlya-opredeleniya-parametrov-kolebaniy-lopatok-turboagregatov> (дата обращения: 21.01.2026).

