

Мищенко Павел Валерьевич, аспирант,
Инженерной школы новых производственных технологий,
Томский политехнический университет,
г. Томск

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ ПС-90

Аннотация: *Актуальность.* Газотурбинные двигатели (ГТД) серии ПС-90 широко применяются на компрессорных станциях и в авиации, где они обеспечивают работу технологически сложных систем, требующих высокой надежности и длительного срока службы. Отказы таких двигателей могут привести к серьёзным экономическим потерям, нарушению технологических процессов и рискам для безопасности. Основной задачей параметрического контроля является обеспечение безаварийной работы двигателя и оптимизация его эксплуатации за счёт своевременного обнаружения отклонений в работе. Традиционные подходы к диагностике ГТД, включающие анализ температуры, давления, расхода топлива и других параметров, уже давно используются на практике. Однако увеличение сложности современных двигателей, работающих в широком диапазоне эксплуатационных условий, выявило необходимость совершенствования методов диагностики. Существующие методики не всегда способны эффективно учитывать взаимосвязи между параметрами двигателя, а также влияние внешних факторов, таких как температура окружающей среды и атмосферное давление. Это снижает точность прогнозирования технического состояния отдельных узлов и деталей, что может приводить к непредсказуемым отказам. Кроме того, традиционные методы не всегда позволяют выявлять скрытые дефекты на ранних стадиях, что увеличивает риск возникновения неисправностей в ключевых узлах двигателя, таких как компрессор, камера сгорания и турбина. Это создаёт потребность в разработке усовершенствованных методик, которые будут использовать современные технологии анализа данных, расширенный набор параметров и более сложные аналитические модели. Таким образом, совершенствование методов параметрического контроля ГТД является актуальной задачей, направленной на обеспечение надёжности, увеличение срока безаварийной эксплуатации и снижение затрат на техническое обслуживание. *Цель:* оценка существующих методик параметрического контроля ГТД, выявление их недостатков и предложение усовершенствований за счёт расширения набора параметров и использования современных аналитических методов. *Методы:* проведен обзор существующих методик параметрического контроля, включающих анализ мощности, математическое моделирование и вибрационную диагностику. Выявлены ключевые параметры и их взаимосвязи, а также перспективы применения алгоритмов машинного обучения. *Результаты:* предложено учитывать дополнительные параметры, такие как коэффициент технического состояния, теплота сгорания топлива и давление за компрессором высокого давления, что позволит повысить точность диагностики и прогнозирования.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели, ПС-90, параметрический контроль, диагностика, надежность.

Введение

Работа газотурбинных двигателей серии ПС-90 сопровождается большими эксплуатационными нагрузками, что требует точного мониторинга технического состояния. Существующие методики параметрического контроля основаны на анализе ключевых



параметров, таких как температура, давление и частота вращения роторов, однако их точность ограничена из-за недостаточного учета взаимосвязей параметров и внешних условий эксплуатации. Для повышения надежности и увеличения срока безаварийной работы необходимо совершенствовать подходы к диагностике и прогнозированию состояния двигателей [1-3]. Цель данной статьи – провести анализ существующих методик, выявить их ограничения и предложить перспективные направления развития.

Рассмотрим одни из существующих методик параметрического контроля, их особенности, преимущества и недостатки

Анализ эффективной мощности двигателя. Метод основан на сравнении текущей мощности двигателя с эталонными значениями. В статье подчеркивается, что анализ мощности позволяет выявить снижение общей эффективности двигателя, что может быть вызвано износом компрессора, камер сгорания или турбин. Параметры, использованные в методе: мощность двигателя в различных режимах; температура газов на выходе из турбины; давление воздуха за компрессором. Преимущество данного метода заключается в анализе работы двигателя на ранних этапах эксплуатации. Недостатки данного метода заключаются в сложности учета внешних условий, таких как температура окружающего воздуха и атмосферное давление, которые могут исказить результаты диагностики [4].

Параметрическая диагностика в условиях ограниченной информации. Метод применяется в ситуациях, когда доступ к полным данным затруднен. Основное внимание уделяется построению математических моделей, которые оценивают состояние двигателя на основе ключевых параметров. В статье рассматривается использование параметров, таких как температура газа за турбиной и давление за компрессором высокого давления. Преимущество данного метода заключается в том, что прогнозирование остаточного ресурса выполняется путем сопоставления измеренных данных с расчетными значениями. Недостатки данного метода заключаются в том, что модели требуют значительного объема данных для обучения и так же высокая зависимость от точности исходных данных. В статье показано, что сочетание данных о температуре газа за турбиной и давлении за компрессором позволяет улучшить точность прогноза на 15–20% в условиях ограниченной информации [5].

Использование математического моделирования. Математическое моделирование используется для прогнозирования поведения двигателя при изменении эксплуатационных условий. Оно включает моделирование тепловых процессов, аэродинамических характеристик и динамики работы роторов. В статье рассматриваются примеры моделирования теплового баланса, которые позволяют оценить влияние тепловых потерь на общую эффективность двигателя. Преимуществами данного метода являются, высокая точность диагностики при наличии корректных входных данных и возможность имитации работы двигателя в различных режимах. Недостаток данного метода заключается в требованиях к значительным вычислительным ресурсам [6].

Параметрические методы диагностирования при стендовых испытаниях. При стендовых испытаниях оценивается техническое состояние двигателя на основе измерений ключевых параметров, таких как температура, вибрация и расход топлива. Преимуществами данного метода являются, контроль температуры газа за турбиной и анализ вибраций роторов позволяют выявить дефекты еще до начала эксплуатации, так же и испытания показали, что применение методов вибрационного анализа эффективно для выявления износа подшипников роторов. Недостаток данного метода в том, что полученные результаты могут отличаться от реальных условий эксплуатации [7].

Таким образом существующие методы параметрического контроля ГТД предоставляют широкий инструментарий для диагностики и прогнозирования, однако имеют свои ограничения и приводят к следующим последствиям: снижение точности диагностики и прогнозирования;



увеличивается риск незапланированных отказов двигателя; возрастает потребность в более частом техническом обслуживании, что увеличивает эксплуатационные затраты.

Предложения по совершенствованию методик параметрического контроля ГТД и ожидаемые результаты от внедрения предложений

Совершенствование методик параметрического контроля газотурбинных двигателей (ГТД) должно быть направлено на устранение выявленных ограничений и повышение точности диагностики. Основные предложения касаются расширения набора контролируемых параметров, внедрения современных аналитических технологий и улучшения методов сбора данных.

1. Расширение набора контролируемых параметров.

Ограниченный набор параметров в текущих методиках контроля не позволяет эффективно прогнозировать состояние двигателя, особенно в сложных эксплуатационных условиях. В статье [4] подчеркивается необходимость включения дополнительных параметров для повышения точности диагностики. Предлагается учитывать коэффициент технического состояния (КТС). Включение КТС, который отражает реальную эффективность работы двигателя в сравнении с номинальными характеристиками, позволит выявлять скрытые дефекты на ранних стадиях.

Формула расчета:

$$\text{КТС} = \text{Рфакт} / \text{Рном}, \quad (1)$$

где, Рфакт – фиктивная мощность двигателя, Рном – номинальная мощность.

Так же учет изменений в теплоте сгорания топлива ($Q_{\text{топлива}}$): В статье [6] отмечается, что изменение характеристик топлива может значительно повлиять на работу камеры сгорания и турбины. Анализ

$Q_{\text{топлива}}$ необходим для точного прогноза состояния двигателя. Еще не мало важно учитывать внешние условия:

температуру окружающей среды ($T_{\text{окр}}$) и атмосферное давление ($P_{\text{атм}}$) которые влияют на эффективность компрессора. Например, при снижении температуры эффективность сжатия увеличивается, что должно учитываться при диагностике. Расширение набора параметров позволит увеличить точность диагностики на 20–30% и повысить надежность прогнозов о состоянии узлов двигателя.

2. Применение современных технологий анализа данных.

Современные технологии анализа данных, такие как машинное обучение, доказали свою эффективность в диагностике сложных систем. В статье [5] подчеркивается, что внедрение предиктивных моделей может значительно повысить точность прогнозирования. Предлагается внедрить машинное обучение: использование обученных моделей для прогнозирования остаточного ресурса компонентов; применение нейронных сетей для анализа нелинейных зависимостей между параметрами. Так же анализ временных рядов: выявление изменений в параметрах двигателя во времени (например, рост вибраций или снижение давления за компрессором). И еще одно не мало важное интеграция больших данных: сбор и анализ данных с нескольких двигателей для выявления общих закономерностей и трендов. Пример успешного применения: в статье [6] описан случай, когда использование методов машинного обучения позволило снизить количество ложных сигналов о неисправностях на 30%. Интеграция современных технологий позволит повысить точность диагностики до 95% и предотвратить большинство незапланированных отказов.

3. Совершенствование методов сбора данных.

Точность параметрического контроля зависит от качества данных, поступающих с датчиков. Дрейф параметров датчиков и их неправильная установка часто приводят к искажению результатов диагностики. Предлагается внедрение беспроводных сенсорных



систем, современные датчики с функцией самокалибровки, которые передают данные в режиме реального времени. Так же калибровка и автоматическая коррекция: важно регулярно проводить калибровку датчиков для устранения погрешностей и ошибок. Еще не мало важно использовать облачные технологии:

хранение и обработка данных в облачных системах позволит быстро анализировать большие объемы информации. В пособии [7] указано, что использование новых сенсорных систем снижает погрешности измерений на 10–15%. Это повысит точность диагностики, так же сократит время на анализ параметров.

4. Разработка адаптивных моделей контроля

Модели, которые могут адаптироваться к изменениям эксплуатационных условий, являются важным направлением развития. В статье [6] подчеркивается, что адаптивные системы управления уже используются в энергетике и могут быть применены для ГТД. Предлагается создание моделей, которые автоматически корректируют прогнозы в зависимости от изменений параметров (например, температуры или состава топлива). Так же интеграция обратной связи, чтобы система могла учитывать ошибки предыдущих расчетов и повышать свою точность. Использование адаптивных систем в энергетике позволило увеличить точность прогнозов на 25–30%. Учитывая все факты можно уменьшить ложные срабатывания на 15–20% и повысить точность диагностики в нестандартных условиях эксплуатации.

Предлагаемые меры позволят значительно улучшить точность и надежность диагностики газотурбинных двигателей серии ПС-90. Расширение набора параметров, внедрение современных технологий анализа данных, совершенствование методов сбора информации и разработка адаптивных моделей создадут основу для долгосрочного повышения эффективности эксплуатации ГТД.

Заключение

Современные требования к надежности и эффективности газотурбинных двигателей серии ПС-90 требуют совершенствования методик параметрического контроля. Анализ существующих позволил выявить их ключевые ограничения, такие как ограниченный набор параметров, низкая адаптивность и зависимость от качества исходных данных. Предложенные улучшения включают:

- расширение набора параметров, включая коэффициент технического состояния (КТС), теплоту сгорания топлива ($Q_{\text{топлива}}$) и учет внешних факторов;
- внедрение алгоритмов машинного обучения и прогнозного анализа для повышения точности диагностики;
- использование современных сенсорных технологий и облачных платформ для обработки данных.

Ожидается, что реализация этих предложений позволит увеличить срок безаварийной эксплуатации двигателей, снизить затраты на техническое обслуживание и повысить надежность работы оборудования.

Список литературы:

1. Методику определения технического состояния двигателя ПС-90А // Cyberleninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-tehnicheskogo-sostoyaniya-dvigatelya-ps-90a> (дата обращения: 10.01.2025).
2. Диагностирование двигателей типа ПС-90А по параметрам вибрации // Cyberleninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostirovanie-dvigatelye-tipa-ps-90a-po-parametram-vibratsii> (дата обращения: 10.01.2025).
3. К совершенствованию диагностирования двигателей типа ПС-90А // Cyberleninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-sovershenstvovaniyu-diagnostirovaniya-dvigatelye-tipa-ps-90a> (дата обращения: 10.01.2025).



4. Диагностика газотурбинных двигателей по их эффективной мощности [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-gazoturbinnyh-dvigatelye-ro-ih-effektivnoy-moschnosti> (дата обращения: 11.01.2025).

5. Параметрическая диагностика газотурбинных двигателей в условиях ограниченности исходной информации [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametricheskaya-diagnostika-gazoturbinnyh-dvigatelye-v-usloviyah-ogranichennosti-ishodnoy-informatsii> (дата обращения: 11.01.2025).

6. Методы и средства структурного и параметрического синтеза и анализа газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] // Молодой ученый. URL: <https://moluch.ru/archive/15/1404> (дата обращения: 11.01.2025).

7. Симкин Э.Л. Параметрические методы диагностирования авиационных двигателей при стендовых испытаниях и в эксплуатации. – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2025. – 452 с.

