

УДК 681.518.5

ОНЛАЙН ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

В.Н. Белопухов

*Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук –
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук*
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: bvnsam@mail.ru

С.Ю. Боровик

*Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук –
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук*
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: borovik@iccs.ru

М.М. Кутейникова

*Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук –
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук*
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: m.kuteynikova@mail.ru

П.Е. Подлипнов

*Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук –
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук*
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: pepodlypnov@yandex.ru

Ю.Н. Секисов

*Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук –
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук*
Россия, 443020, Самара, Садовая ул., 61
E-mail: sekisov@iccs.ru

А.В. Блинов

АО «ОДК-Авиадвигатель»
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 93
E-mail: blinov-av@avid.ru

Е.А. Голдобин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 23
E-mail: goldobinegor11@gmail.com

Ключевые слова: жидкостный реактивный двигатель, авиационный газотурбинный двигатель, газовоздушный тракт, посторонние предметы, подшипниковые узлы, разрушение, частицы износа, одновитковый вихретоковый датчик, онлайн диагностика.

Аннотация: рассматривается подход к построению средств онлайн диагностики опасных состояний энергосиловых установок большой мощности, вызванных разрушением пар трения в авиационных и ракетных двигателях, а также попаданием посторонних предметов в газовоздушный тракт авиационного газотурбинного двигателя. В основе подхода лежат оригинальные одновитковые вихретоковые датчики и их кластерные разновидности. Простота конструкции датчиков обеспечивает высокую технологичность их изготовления и работоспособность сенсоров в условиях интенсивного воздействия внешних влияющих факторов. Приводятся примеры отдельных практических задач, решаемых в рамках предлагаемого подхода.

1. Введение

Характерными представителями силовых установок большой мощности являются газотурбинные двигатели (ГТД) авиационного, наземного и морского назначения [1], а также жидкостные ракетные двигатели (ЖРД), используемые в современных ракетах-носителях [2]. Применение ГТД и ЖРД в критически важных областях промышленности и техники предъявляет высокие требования к надежности и ресурсу их узлов и агрегатов. Типичными элементами конструкций ГТД и ЖРД, подвергающихся наибольшему изнашиванию, являются пары трения (подшипниковые узлы, шестерни редукторов и т.п.). Учитывая энерговооруженность силовых установок подобного класса, представляется очевидным, что разрушение этих узлов и агрегатов может привести не только к выходу из строя самой установки, но и объекта, на котором она установлена (самолет, вертолет, ракета-носитель и т.п.) с критическими последствиями, включая человеческие жертвы [3-5].

Для авиационных ГТД, имеющих открытый вход в проточную часть, еще одной важной проблемой является попадание и засасывание в вентилятор или компрессор посторонних предметов (продуктов обледенения воздухозаборника, твердых предметов с поверхности взлетно-посадочной полосы или рулежной дорожки, птиц и т.п.), которые могут нанести вред всей проточной части ГТД и привести к опасным последствиям - помпажу, падению тяги, пожару, и т.п. [6]. Даже если попадание посторонних предметов не приводит к видимым повреждениям, эти события могут оказывать негативные воздействия на нагруженные роторные детали, провоцируя их преждевременное разрушение с возможными катастрофическими последствиями.

Таким образом, техническая диагностика состояния элементов конструкций силовых установок большой мощности непосредственно в процессе их эксплуатации (в онлайн режиме) является актуальной задачей, решение которой позволит сократить число аварийных ситуаций, связанные с преждевременным разрушением узлов и агрегатов машин [7]. При этом необходимо отметить, что получение информации о техническом состоянии таких объектов контроля обычно происходит в условиях влияния большого числа воздействующих факторов, связанных со спецификой работы и условиями эксплуатации как самой силовой установки, так и объекта, на который она установлена [8]. Зачастую такие условия можно охарактеризовать как тяжелые или

даже экстремальные, что накладывает дополнительные ограничения на использование технических средств контроля состояния объектов диагностики.

В работе предлагается подход к построению средств онлайн диагностики опасных состояний энергосиловых установок большой мощности, вызванных разрушением пар трения в авиационных и ракетных двигателях, а также попаданием посторонних предметов в газоздушный тракт авиационного ГТД. Рассматриваемые средства объединяет использование оригинальных одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) [9, 10], простота конструкции которых обеспечивает высокую технологичность их изготовления и работоспособность в условиях интенсивного воздействия внешних влияющих факторов [8]. Также приводятся примеры практических реализаций подхода, часть из которых была опробована в лабораторных и стендовых условиях.

2. Предлагаемый подход

2.1. Одновитковые вихретоковые датчики

По сути, все существующие на сегодняшний день ОВТД можно разделить на две большие группы: ОВТД, в которых в качестве чувствительного элемента (ЧЭ) используется виток (контур) с током целиком (рис. 1, а) и ОВТД, в которых в качестве ЧЭ выступает фрагмент витка с током обычно в виде отрезка проводника (рис. 1, б) [8, 10].

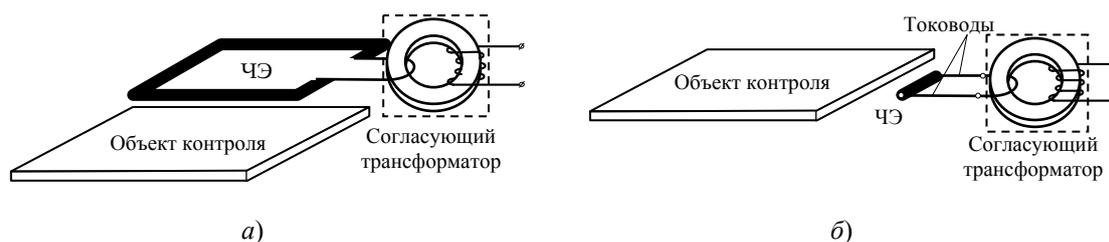


Рис. 1. ОВТД с ЧЭ в виде одиночного контура с током (а) и с ЧЭ в виде отрезка проводника (б) [10].

Это в полной мере относится и к датчикам, которые могут использоваться для диагностики состояния элементов конструкций энергосиловых установок. В частности, для контроля частиц износа пар трения в маслосистемах силовых установок большой мощности был разработан кластерный вихретоковый датчик (ДВК) металлических частиц [11], который представляет собой многоканальный ОВТД I группы с ЧЭ в виде одиночного контура тока и с параллельной обработкой сигналов. В свою очередь, кластерные композиции ОВТД II группы с ЧЭ в виде отрезка проводника [9] могут использоваться для обнаружения колебаний лопаток [12], вызванных попаданием посторонних предметов в газоздушный тракт ГТД, либо (ОВТД в специальном исполнении со смещенными ЧЭ [13, 14]) для диагностики износа радиально-упорных подшипников турбонасосного агрегата ЖРД. Работоспособность ОВТД в экстремальных условиях эксплуатации обеспечивается, прежде всего, за счет простейшей конструкции ЧЭ, который не требует высокотемпературной изоляции, а его механическая и термическая прочность определяется лишь свойствами используемого материала. Именно этот факт делает датчик привлекательным для авиационного и ракетного применения. Учитывая малую собственную индуктивность одновиткового ЧЭ, его подключение к измерительной цепи осуществляется через

согласующий трансформатор, который с помощью тоководов выносятся их зоны измерения в зону с благоприятными внешними условиями. При этом, для повышения уровня полезного сигнала, в ОВТД используется импульсное питание датчика, которое позволяет повысить амплитуду информационного сигнала на выходе измерительной цепи за счет увеличения величины напряжения импульса питания датчика. При необходимости сохранение теплового режима датчика достигается за счет уменьшения длительности импульсов.

2.2. Структура системы онлайн диагностики*

Функциональная схема систем онлайн диагностики состояния элементов конструкций энергосиловых установок на основе применения ОВТД в обобщенном виде представлена на рис. 2.

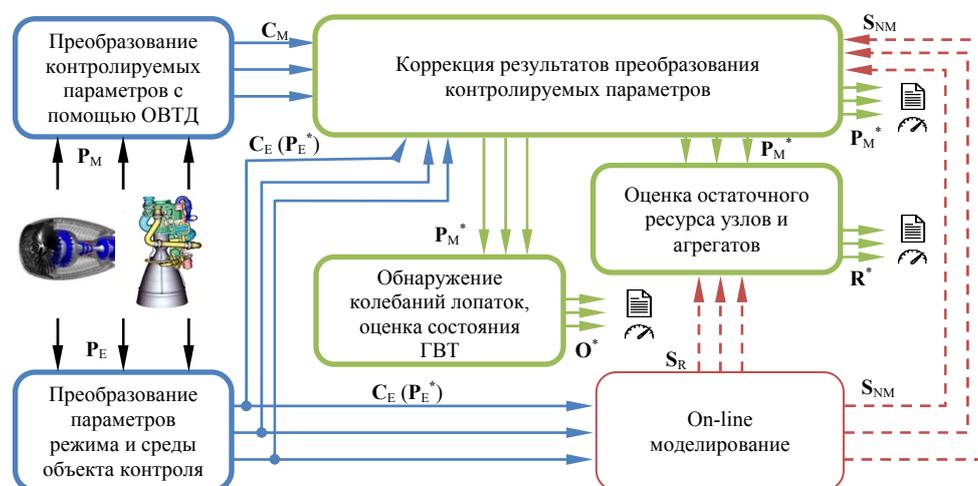


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема систем онлайн диагностики состояния элементов конструкций энергосиловых установок большой мощности на основе ОВТД.

Объект контроля характеризуется вектором измеряемых (контролируемых) параметров \mathbf{P}_M (перемещения валов в упорных подшипниках, число и размер частиц износа пар трения в системах смазки, амплитуда и частота колебаний лопаток и т.д.) и вектором параметров режима и среды объекта \mathbf{P}_E (температура в зоне измерения, частоты вращения валов ротора и т.д.). Здесь следует отметить, что с точки зрения задач диагностики, элементы \mathbf{P}_E обычно являются влияющими факторами, которые оказывают негативное воздействие на технические средства контроля [8]. Предполагается, что параметры состояния узлов и агрегатов силовой установки контролируются с помощью ОВТД, а параметры режима и среды объекта определяются по результатам измерения с помощью штатных датчиков (ДЧВ, термопары и т.д.), входящих в состав контрольно-измерительной аппаратуры силовой установки или стендового оборудования.

После преобразований, \mathbf{P}_M и \mathbf{P}_E трансформируются в векторы \mathbf{C}_M и \mathbf{C}_E , обычно содержащие цифровые коды, соответствующие элементам \mathbf{P}_M и \mathbf{P}_E . Отдельные результаты измерений параметров режима и среды в виде цифровых кодов \mathbf{C}_E или непосредственно вычисленных физических значений \mathbf{P}_E^* (например, результаты измерений угловых скоростей и ускорений роторов, температур в зоне измерения и т.д.), могут использоваться для коррекции результатов преобразования контролируемых параметров. Если по соображениям конструктивного или технологического характера на силовой установке не удастся установить датчики,

обеспечивающие измерение параметров среды и режима, оказывающих влияние на результат преобразования контролируемых параметров (\mathbf{P}_M^*), то их учет возможен на основе моделирования поведения объекта и/или средств измерений (\mathbf{S}_{NM}). Модели могут также использоваться для оценки остаточного ресурса (\mathbf{R}^*) узлов и агрегатов силовых установок, например подшипников в составе приводов ГТД [15]. В свою очередь, для обнаружения колебаний лопаток (\mathbf{O}^*), связанных, в том числе, с попаданием посторонних предметов в газоздушный тракт (ГВТ) двигателя или возникшими срывными явлениями, используются результаты прямых измерений моментов времени, соответствующих прохождению торцами рабочих лопаток колеса компрессора или турбины относительно выбранной точки на статорной оболочке турбомшины [16] (относятся к вектору контролируемых параметров \mathbf{P}_M^*), которые затем сопоставляются с аналогичными значениями, полученными на предыдущих периодах вращения лопаточного колеса.

3. Примеры реализации

3.1. Система непрерывного контроля частиц износа подшипниковых узлов ГТД

Одной из реализаций рассмотренного выше подхода является макетный образец системы непрерывного контроля частиц износа (СНКЧИ) подшипниковых узлов в системе смазки ГТД, работоспособность которого была проверена в лабораторных условиях и стендовых испытаниях при подключении к маслосистеме работающего ГТД [11]. Структура макета системы представлена на рис. 3, а), а внешний вид используемого в системе ДВК, подключенного к маслосистеме ГТД – на рис. 3, б).

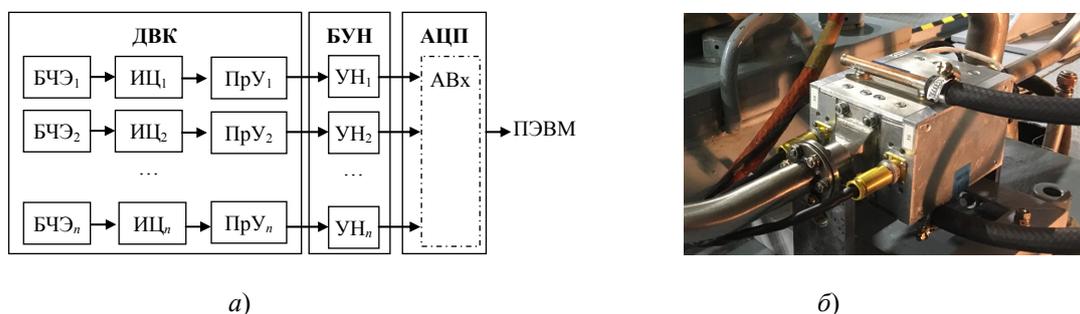


Рис. 3. Структура СНКЧИ (а) и внешний вид ДВК, подключенного к маслосистеме ГТД (б) [11].

ДВК содержит 6 идентичных масляных каналов суммарная площадь поперечных сечений которых равна площади сечения маслопровода на входе в датчик. Каждый масляный канал охватывается двумя ЧЭ (на рис. 3 они обозначены как блоки ЧЭ БЧЭ₁...БЧЭ_n), включаемыми в индивидуальную измерительную цепь на основе дифференциальной схемы с трансформаторным мостом Блюмлейна [17]. Напряжение на выходе измерительных цепей усиливается (блоки предварительного усиления ПрУ₁...ПрУ_n) и нормализуется в блоке усиления и нормализации (БУН) до уровня, соответствующему входному сигналу выбранного АЦП (блоки усиления и нормализации УН₁...УН_n).

В ходе стендовых испытаний функционирование СНКЧИ было проверено на всех рабочих режимах ГТД – от малого газа до взлетного. При этом число, размеры и

магнитные свойства частиц, обнаруживаемых ДВК, в общем, подтверждались результатами лабораторных анализов смывов проб на фильтрах стружки, а также замерах, проведенными с помощью системы MetalScan [18]. При этом кластерная конструкция ДВК дополнительно позволила оценить особенности течения масла в трубопроводе системы смазки ГТД. Следует также отметить, что на данном этапе СНКЧИ реализует лишь функции контроля состояния подшипниковых узлов без оценки остаточного ресурса, а потому в программном обеспечении системы отсутствуют соответствующие модули, представленные на рис. 2.

3.2. Система диагностики радиально-упорного подшипника турбонасосного агрегата НК-33

Еще одним примером, демонстрирующим подход к созданию технических средств диагностики состояния элементов конструкций силовых установок большой мощности на основе применения ОВТД, является система, предназначенная для контроля разрушения радиально-упорного подшипника турбонасосного агрегата (ТНА) ЖРД НК-33 [13]. Структура и внешний вид макетного образца системы представлены на рис. 4, а), б), соответственно.

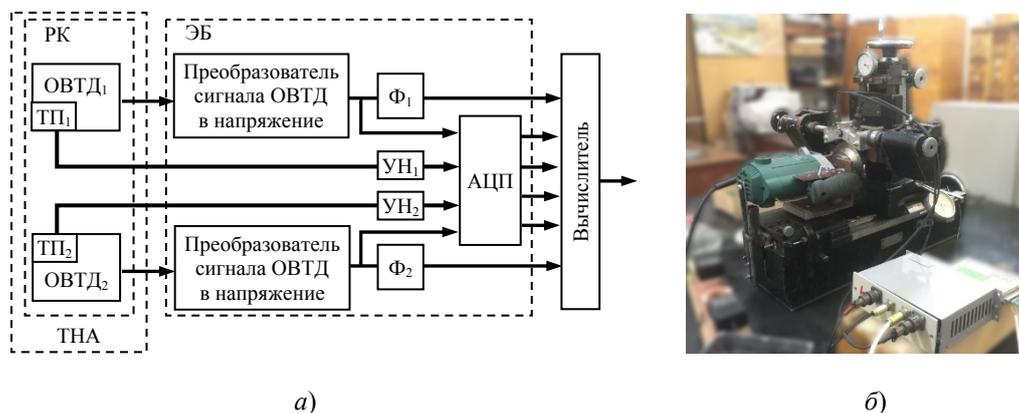


Рис. 4. Структура (а) и внешний вид макетного образца (б) системы диагностики радиально-упорного подшипника ТНА ЖРД НК-33.

В системе используется распределенный кластер из двух идентичных по своим параметрам ОВТД₁ и ОВТД₂ со смещенными центрами ЧЭ [14] и встроенными термопарами (ТП). ОВТД замещают штатные ДЧВ в существующем блоке контроля частоты вращения вала ТНА и позволяют помимо определения скорости вращения вала, измерять его перемещения в осевом направлении, характеризующие износ подшипника. Через тоководы и согласующие трансформаторы ЧЭ датчиков подключаются каждый к своему преобразователю сигналов, расположенных в отдельном электронном блоке (ЭБ) и содержащих индивидуальные измерительные цепи, реализующие метод первой производной [17], а также усилители-нормализатор, обеспечивающий согласование напряжений на выходе измерительных цепей с последующими устройствами аналого-цифрового преобразования и обработки сигналов. Сигналы термопар поступают на свои усилители-нормализаторы (УН), выполняющие те же функции, что и аналогичные устройства в преобразователях сигналов ОВТД. Нормализованные напряжения с выходов преобразователей сигналов ОВТД, и с выходов УН₁ и УН₂ сигналов термопар подаются на многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Вычислитель системы (в рассматриваемом

случае – ПЭВМ) обеспечивает термокоррекцию результатов преобразования ОВТД и определение искомым смещений вала ТНА в радиально-упорном подшипнике. Параллельно с аналого-цифровым преобразованием напряжений с выходов преобразователей сигналов ОВТД, в индивидуальных формирователях Φ_1 и Φ_2 осуществляется генерация прямоугольные импульсов, необходимых для вычисления частоты вращения вала ТНА и передачи в систему управления ЖРД. Как и в предыдущем случае, здесь не рассматриваются задачи оценки остаточного ресурса подшипника, а потому отсутствует необходимость использования онлайн моделирования параметров объекта и среды измерения.

4. Заключение

Предложен подход к построению средств онлайн диагностики опасных состояний узлов и агрегатов энергосиловых установок большой мощности, основанный на использовании оригинальных ОВТД и их кластерных композиций, сохраняющих работоспособность в условиях интенсивного воздействия внешних влияющих факторов, свойственных условиям эксплуатации авиационных ГТД и ЖРД, применяемых в современных ракетах-носителях. Реализуемость подхода продемонстрирована на конкретных примерах систем контроля параметров авиационных и ракетных двигателей, часть из которых была опробована в лабораторных и стендовых условиях.

Список литературы

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т.1.: Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы. М.: Машиностроение, 2008. 199 с.
2. Тресвятский С.Н., Федорченко Д.Г., Данильченко В.П. Космические двигатели СНТК имени Н.Д. Кузнецова // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2006. Т. 10, № 2-1. С.16-22.
3. Причиной аварии Ан-24 стала стружка в масле двигателя // <http://www.irk.ru/news/20110719/shavings/> (дата обращения 10.01.2024).
4. NASA Independent Review Team Orb-3 Accident Investigation Report. Executive Summary // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3_irt_execsumm_0.pdf (дата обращения 10.01.2024).
5. Отказы двигателей отечественной авиационной техники // <http://aeroass.ru/engines/777-otkazy-dvigatelay-otechestvennoy-aviacionnoy-tehniki.php> (дата обращения 10.01.2024).
6. Нихамкин М.Ш., Семенова И.В. Вероятностная оценка стойкости лопаток компрессора ГТД к повреждению посторонними предметами // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3 (19). С. 93-97.
7. Киселев Ю.В. Основы теории технической диагностики. Самара: СГАУ, 2004. 138 с.
8. Borovik, S.; Kuteynikova, M.; Sekisov, Y. Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors // Sensors. 2023. Vol. 23. P. 351. <https://doi.org/10.3390/s23010351> (дата обращения 10.01.2024).
9. Borovik S., Sekisov Y. Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines // Sensors. 2020. Vol. 20. P. 2107. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/7/2107> (дата обращения: 10.01.2024).
10. Borovik S., Sekisov Y. Single-Coil Eddy Current Sensors // Sensors. Measurements and Networks. Book Series: Advances in Sensors. Vol. 8. Barcelona: IFSA Publishing, S.L., 2022. P. 19-48.
11. Belopukhov V., Blinov A., Borovik S., Luchsheva M., Muhutdinov F., Podlipnov P., Sazhenkov A., Sekisov Y. Monitoring metal wear particles of friction pairs in the oil systems of gas turbine power plants // Energies. 2022. Vol. 15. P. 4896. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4896> (дата обращения: 10.01.2024).
12. Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Способы измерения и обнаружения колебаний лопаток в экспериментальных исследованиях и диагностике срывных и помпажных

- явлений в компрессорах газотурбинных двигателей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IV международной конференции. Самара, 2002. С. 539-545.
13. Belosludtsev V., Borovik S., Danilchenko V., Sekisov Y. Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors // *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 3463. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/10/3463> (дата обращения: 10.01.2024).
 14. Белослудцев В.А., Боровик С.Ю., Коршиков И.Г., Секисов Ю.Н. Патент РФ №2778031 Вихретоковый датчик со смещенным чувствительным элементом: № 2021110157: заявл. 12.04.2021: опубл. 12.08.2022.
 15. Blinov A., Borovik S., Luchsheva M., Muhutdinov F., Sekisov Yu. Monitoring the state of power plants' friction pairs on the basis of single-coil eddy-current sensors // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1891. P. 012053. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1891/1/012053> (дата обращения: 10.01.2024).
 16. Blade Tip Timing. FOCIST™ Blade Tip Timing System. <https://primephotonics.com/index.php/en/blade-tip-timing> (дата обращения: 10.01.2024).
 17. Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Беленький Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К., Слепнев А.В., Тулупова В.В. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. Самара: Изд. СамНЦ РАН, 2001. 188 с.
 18. Халиуллин В. Маслосистема под непрерывным контролем // Информационно-технический бюллетень «Пермские газовые турбины». 2012. № 22. С. 46-48.