

*А.В. ГАЙДАМАКА, Ю.Д. МУЗЫКИН, В.В. ТАТЬКОВ, Д.Ю. БОРОДИН*

### МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)

Резьбовые соединения, включающие соединяемые детали и резьбовой крепеж (болты, винты, шпильки, гайки, шайбы), широко используются в промышленности, строительстве, быту благодаря многочисленным преимуществам, которыми они обладают по сравнению с другими видами соединений. Однако в условиях переменных нагрузок наблюдается ослабление затяжки резьбовых соединений вплоть до раскрытия их стыка и разрушения крепежа. Признаком ослабления затяжки резьбовых соединений является уменьшение осевой силы (напряжения) в стержне болта (шпильки, винта), а признак начинающегося разрушения соединения - трещины в деталях крепежа. Непрерывный контроль измеряемых параметров и сравнение их величин с пороговыми значениями осуществляется мониторингом соответственно величин напряжений и трещин в болтах (шпильках, винтах). В настоящей статье рассмотрены основные принципы, даны сравнительные характеристики, проанализированы достоинства и недостатки наиболее известных методов мониторинга резьбовых соединений с крупным крепежом ( $d = 30 \dots 200$  мм), а также обсуждается возможность применения некоторых из них для мониторинга резьбовых соединений турбинного оборудования электростанций.

**Ключевые слова:** резьбовой крепеж; напряжение в болте (шпильке, винте); мониторинг затяжки и разрушения; резьбовое соединение турбинного оборудования электростанций

*А.В. ГАЙДАМАКА, Ю.Д. МУЗЫКИН, В.В. ТАТЬКОВ, Д.Ю. БОРОДИН*

### МЕТОДИ МОНИТОРИНГУ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ)

Різьбові з'єднання, що включають деталі, що з'єднуються і різьбові кріплення (болти, гвинти, шпильки, гайки, шайби), широко використовуються в промисловості, будівництві, побуті завдяки численним перевагам, якими вони володіють у порівнянні з іншими видами з'єднань. Однак в умовах змінних навантажень спостерігається ослаблення затягування різьбових з'єднань аж до розкриття їх стику і руйнування кріплення. Ознакою ослаблення затягування різьбових з'єднань є зменшення осевої сили (напруги) в стержні болта (шпильки, гвинта), а ознака початку руйнування з'єднання - тріщини в деталях кріплення. Безперервний контроль вимірюваних параметрів можуть відрізнитися і порівняння їх величин з граничними значеннями здійснюється моніторингом відповідно величин напруг і тріщин в болтах (шпильках, гвинтах). У цій статті розглянемо основні принципи, дані порівняльні характеристики, проаналізовані переваги і недоліки найбільш відомих методів моніторингу різьбових з'єднань з великим кріпленням ( $d = 30 \dots 200$  мм), а також обговорюється можливість застосування деяких з них для моніторингу різьбових з'єднань турбінного устаткування електростанцій.

**Ключові слова:** різьбове кріплення; напруження у болті (шпильці, гвинті); моніторинг затяжки і руйнування; різьбове з'єднання турбінного устаткування електростанцій

*A. GAYDAMAКА, Y. MUZIKIN, V. TAT'KOV, D. BORODIN*

### METHODS OF MONITORING OF THE THREADED CONNECTIONS (A REVIEW)

Threaded connections, including connected parts and threaded fasteners (bolts, screws, studs, nuts, washers), are widely used in industry, construction, and everyday life due to the numerous advantages they have over other types of connections. However, under conditions of variable loads, a weakening of tightening of threaded connections is observed up to the opening of their joint and destruction of fasteners. A sign of a loosening of the tightening of threaded connections is a decrease in the axial force (stress) in the rod of a bolt (stud, screw), and a sign of incipient destruction of the connection is a crack in the fasteners. Continuous monitoring of the measured parameters and comparison of their values with threshold values is carried out by monitoring, respectively, the magnitudes of stresses and cracks in bolts (studs, screws). This article discusses the basic principles, gives comparative characteristics, analyzes the advantages and disadvantages of the most well-known methods for monitoring threaded connections with large fasteners ( $d = 30 \dots 200$  mm), and also discusses the possibility of using some of them for monitoring threaded connections of turbine equipment of power plants.

**Keywords:** threaded fasteners; stress in a bolt (stud, screw); monitoring of tightening and failure; threaded connection of turbine equipment of power plants

**Введение.** Среди резьбовых соединений резьбовые наиболее широко распространены вследствие их неоспоримых преимуществ: высокая нагрузочная способность и надёжность при статическом нагружении, наличие большой номенклатуры крепежа, удобство монтажно-демонтажных операций, простота конструкции, относительная дешевизна. Определяющим фактором надёжной работы резьбовых соединений (РС) является нормирование усилия их затяжки. В условиях переменного нагружения, когда наблюдается микроперемещения по поверхностям трения резьбы, головки болта (винта) и гайки, в контакте с соединяемыми деталями РС становятся ненадёжными [1, 2]. Переменные нагрузки способствуют ослаблению затяжки соединяемых деталей вплоть до раскрытия их стыка и разрушения деталей резьбового крепежа (РК) [3].

В этой связи возникает необходимость проведения мониторинга РК, обеспечивающего непре-

рывный контроль измеряемых параметров и сравнение их величин с предельными значениями. При этом первостепенными являются вопросы применяемых средств измерений, их технических возможностей и соответствующих требований к обслуживающему персоналу.

Различают два направления мониторинга РК: мониторинг разрушения деталей РК и мониторинг затяжки РС. Первый осуществляют путём дефектоскопии резьбовой части крепежа [4], второй - определением напряжений в стержне болта (шпильки, винта) [5]. Особенности мониторинга РК состоят в сложности геометрии резьбовых деталей (вход, сгон, впадины, профиль, угол, высота, шаг резьбы, галтельные переходы), в многообразии материалов и

© А.В. Гайдамака, Ю.Д. Музыкин,  
В.В. Татьков, Д.Ю. Бородин, 2020

типоразмеров, в ограниченности доступа к резьбо-

вым деталям, во множестве помех при контроле. Вследствие указанного для каждого типа РК, как отмечается в [6], необходимо разрабатывать специальную методику мониторинга.

Среди применяемых в настоящее время неразрушающих методов (магнитопорошковый, вихретоковый, капиллярный) контроля РК акустическим методам отдают наибольшее предпочтение из-за высокой чувствительности и достоверности обнаружения дефектов, оперативности и производительности, меньшей стоимости и безопасности в работе.

Акустический неразрушающий контроль, согласно ГОСТ23829-85 [7], осуществляют различными методами анализа акустических волн после их введения в технический объект (ТО) и приёма. Наиболее эффективным методом определения зарождения микротрещин в деталях РС является метод акустической эмиссии (АЭ) [8]. В его основу положены зависимости между характеристиками образовавшихся или распространяющихся дефектов и параметрами излучаемых ими волн, позволяющие осуществлять диагностику источников АЭ в режиме реального времени. Применяя специальное достаточно сложное оборудование, появляется возможность заблаговременно прекратить эксплуатацию и соответственно предотвратить разрушение.

В настоящем обзоре рассмотрены *активные* акустические методы, как наиболее распространённые в технике.

*Целью работы* является обзор и анализ наиболее известных и применяемых акустических методов мониторинга разрушения РК и затяжки РС.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- выполнить обзор методов мониторинга разрушения РК;
- выполнить обзор методов мониторинга затяжки РС;
- сформулировать рекомендации с учётом технико-экономических показателей по применению наиболее эффективных методов мониторинга крупного РК турбинного оборудования на ТЭС, АЭС, ГЭС.

**Методы мониторинга разрушения РК.** Из известных методов акустического контроля ТО для мониторинга разрушения РК наибольшее распространение получил эхо-импульсный метод, реализуемый на основе различных способов.

Он основан на излучении в ТО коротких импульсов упругих колебаний (длительность 0,5 – 10 мкс) и регистрации интенсивности (амплитуды) и времени прихода сигналов, отражённых от трещин. Величина отражённых сигналов даёт представление о размерах дефекта, а интервал между вводом начального импульса и приемом отраженного позволяет определить глубину его залегания. Регистрация эхо-сигналов осуществляется путем их преобразования в электрические импульсы, усиления и отображения на экране дефектоскопа. Усиление сигнала происходит с поправкой на глубину залегания дефекта: чем дальше запаздывание эхо-сигнала, тем больше он усиливается.

Метод позволяет выявлять трещины в деталях

РК без разборки РС. Возникающие при этом проблемы заключаются в отстройке от ложных сигналов, вызываемых отражением от резьбы, и многократных ложных сигналов, соответствующих поперечным волнам, прошедшим поперек сечения стержня. Вследствие наличия таких ложных сигналов единой методики УЗ-контроля различных РС не существует. С помощью преобразователей (прямых и наклонных) вводят ультразвуковую волну, регистрируют отраженные импульсы и анализируют. Для повышения надежности обнаружения трещин, дополнительно повторяют исследование под другим углом, а угол и глубину развития трещины рассчитывают по количеству витков, попадающих в зону звуковых теней трещин при этих углах воздействия звуковых колебаний [9]. Для каждого типа изделий приходится разрабатывать специальные способы [10-13] с учётом соответствующего стандарта акустического контроля РС [14].

Контроль трещин в деталях крупного РК, например шпилек АЭС, производят с помощью так называемых головных волн [15]. В работе [16] представлен анализ состояния неразрушающего контроля РК энергетического оборудования при монтаже и эксплуатации. Показаны различия контроля крепежа в атомной, тепловой и гидроэнергетике. Обоснована возможность и показана практическая реализация обнаружения трещин под резьбой шпилек при контроле с торцевой поверхности. При этом следует руководствоваться методическими материалами и специальными публикациями [17-22]. Для выявления поверхностных и внутренних дефектов РК атомных энергетических установок кроме ультразвукового применяют магнитопорошковый и капиллярный методы мониторинга [23].

**Методы мониторинга затяжки РС.** Важнейшей технической проблемой мониторинга РС остаётся обеспечение оптимального усилия затяжки. Известные методы инженерных расчетов, дающие возможность в некоторых несложных ситуациях определять напряжения в РК [24-27], не позволяют окончательно решить эту проблему в общей постановке без экспериментальных исследований. Это касается в первую очередь особо ответственных РС металлургических заводов, железнодорожного, авиационного, автомобильного и судоходного транспорта, космических летательных аппаратов, сосудов высокого давления нефтегазодобывающей промышленности, энергетических установок гидравлических, тепловых и атомных электрических станций.

Зачастую в РК доступным является только один торец болта (шпильки, винта), поверхность которого считается не подверженной деформации, что существенно затрудняет применение известных физических методов определения напряжений: электротензометрию, рентгеновскую тензометрию, методы магнитоупругости, фотоупругих покрытий. Поэтому широкое распространение получил мониторинг затяжки РС акустическими методами, под которыми понимают совокупность способов и средств контроля, основанных на измерении характеристик упругих продоль-

ных или сдвиговых волн в направлении деформации растяжения. Основное преимущество этих методов заключается в возможности установки первичного датчика (пьезопреобразователя) на недеформированную поверхность (торец) резьбовой детали.

Выбор в пользу методов акустического мониторинга напряжений не столь прост и однозначен, так как во внимание должен быть принят ряд факторов: назначение и тип конструкции, особые требования к ее надежности, качество изготовления и технические условия эксплуатации, окружающие условия, квалификация обслуживающего персонала, экономические аспекты. При этом необходимо: оценить ожидаемую погрешность, учесть влияние внешних воздействий и геометрии объекта, выбрать тип и частоту акустических волн (АВ), а также метод акустических измерений. В общем случае использование методов акустической тензометрии затруднено из-за малости акустоупругого эффекта. Необходимо учитывать влияние таких факторов: дисперсию, дифракцию, затухание АВ в материале ТО; задержку и искажения импульса в контактных слоях; искажения сигнала на торцевых поверхностях ТО и др.

Чаще мониторинг затяжки РС осуществляется по напряжениям, возникающим в стержне болта (винта, шпильки), на основе прямой или косвенной оценки, реже – по площади контакта соединяемых деталей. Повышение напряжения растяжения в стержне болта (винта, шпильки) способствует увеличению контактного давления между соединяемыми деталями, что улучшает прохождение ультразвука. Для ответственных силовых резьбовых деталей важным фактором надёжности является выбор усилия затяжки. В соединении с сильной затяжкой с учётом шероховатости деталей и смазки создаваемое напряжение растяжения болта (винта, шпильки) превышает 80% предела текучести материала ( $\sigma_T$ ), в среднетянутом РС – до 0,8  $\sigma_T$  [1, 28].

**Мониторинг затяжки на основе прямой оценки.** Мониторинг затяжки РС на основе прямой оценки осуществляют непосредственно по удлинению стержня болта (винта, шпильки), по деформации гайки, шайбы с упругими элементами, по углу поворота гайки и показаниям крутящего момента с помощью динамометрического ключа.

**Метод мониторинга затяжки по деформации шайбы.** Мониторинг затяжки РС с помощью специальных шайб, устанавливаемых под головку болта или гайку и имеющих упругие элементы, деформирующиеся под нагрузкой [28], получил широкое распространение для не особо ответственных РС. Каждая шайба предназначена для конкретного резьбового соединения, имеет специальную конструкцию и выполняет определенную функцию (рис. 1, а-в). При увеличении осевого усилия зазор  $\Delta$  (см. рис. 1, з) между элементами шайбы и болта (гайки) уменьшается, о чём свидетельствует резкое увеличение величины момента затяжки.

Иногда на упругие элементы шайбы устанавливают тензодатчики (на рис. 1 не показаны), показания которых служат для контроля силы затяжки.

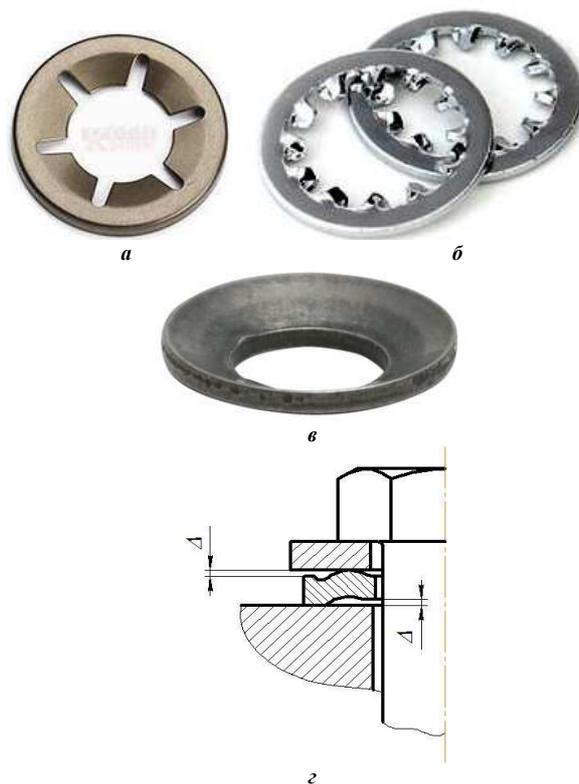


Рисунок 1 – Упругие шайбы для контроля силы затяжки

Метод мониторинга силы затяжки РС по оценке деформации шайбы прост в реализации, но требует изготовления специальных шайб и высокую надёжность упругих элементов. Погрешность измерений – до 10 % [1].

**Метод мониторинга затяжки по удлинению болта (шпильки).** Мониторинг затяжки РС по удлинению болта (винта, шпильки) осуществляют, измеряя деформации стержня болта с помощью тензодатчиков, установленных в его центральном отверстии (рис. 2, а) или на боковой стороне болта (см. рис. 2, б), свободной от резьбы [29]. Для автоматического непрерывного мониторинга усилия затяжки РС в течение всего времени воздействия на исследуемый объект как статических, так и динамических (вибрационных и ударных) нагрузок применяют различные устройства, встроенные в тело болта (шпильки), как например технологическая игла в центральном отверстии болта (рис. 2, в).



Рисунок 2 – Болты для контроля силы затяжки

Основными недостатками мониторинга затяжки при измерении деформаций болтов тензодатчиками

являются существенные ошибки измерений.

Конструктивно более сложным является устройство для контроля усилия затяжки резьбового соединения по патенту [30], которое содержит крепежный элемент 1 с осевым отверстием, соединяемые детали 2, плоскую 3 и пружинную 4 шайбы, гайку 5, стержень 6 в осевом отверстии, закрепленный одним концом в головке крепежного элемента 1, с установленным якорем 7 токовихревого датчика 8 линейных перемещений на другом конце стержня, причём датчик 8 закреплён в колпачке 9, установленном на ненагружаемой резьбовой части крепежного элемента (рис. 3).

Работает устройство следующим образом. При изменении внешней нагрузки  $P$ , действующей на соединяемые детали 2, происходит деформация растягиваемой части крепежного элемента 1 длиной  $L$  на величину  $\Delta L$ . Поскольку резьбовой конец крепежного элемента 1 за пределами гайки 5 не нагружается, то перемещение колпачка 9 с закрепленным на нем датчиком 8 также происходит на величину  $\Delta L$ . На величину  $\Delta L$  увеличивается зазор  $S$  между датчиком 8 и якорем 7, установленным на недеформируемом при изменении нагрузки  $P$  стержне 6. Изменение зазора  $S$  между датчиком 8 и поверхностью якоря 7 регистрируется датчиком 8.

Устройство для контроля усилия затяжки РС [31] содержит кронштейн 1 и качалку 2 с общей осью вращения 3. На концах кронштейна 1 выполнены зажимы 4 и 5 с винтами 6 и 7. Зажим взаимодействует с наружной поверхностью втулки 8, а зажим 5 - с присоединительной гильзой 9 индикатора 10, измерительный стержень 11 которого контактирует с качалкой 2. Вторая плоскость качалки 2 взаимодействует с торцом 12 иглы 13, имеющей буртик 14. Качалка снабжена указателем 15 ее исходного положения относительно кронштейна 1, для чего последний снабжен риской 16. Между кронштейном 1 и качалкой 2 расположена пружина 17. Крепежный элемент 18, например болт, имеет осевое отверстие 19 и гайку 20 для стягивания элементов 21 и 22. Причем элемент 22 имеет, например, нависающую над крепежным элементом часть, ограничивающую к нему доступ. Конец иглы 13, контактирующий с дном отверстия крепежного элемента 18, выполнен с упорной поверхностью, имеющей кольцевой выступ 23 (рис. 4).

Работает устройство следующим образом. Индикатор 10 своей присоединительной гильзой 9 фиксируется винтом 7 в зажиме 5 кронштейна 1 в таком положении, чтобы обеспечить при совпадении указателя положения 15 с риской 16 требуемое начальное поджатие измерительного стержня 11 индикатора 10. В осевое отверстие 19 крепежного элемента 18 при измерении вставляется игла 13. Втулка 8 закрепляется в крепежном элементе 18 так, чтобы иметь с ним надлежащий контакт и чтобы буртик 14 иглы 13 находился в ее внутренней полости, а свободный торец 12 выступал над ее свободной торцевой поверхностью. Кронштейн 1 устанавливается зажимом 4 на втулку 8 и после совпадения указателя положения 15 с риской 16 фиксируется винтом 6. После

установки устройства производится затяжка крепежного элемента 18 гайкой 20 до тех пор, пока индикатор не покажет требуемого удлинения элемента, соответствующего необходимому усилию затяжки.

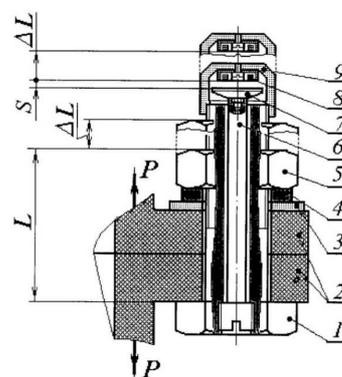


Рисунок 3 – К патенту РФ № 2296307

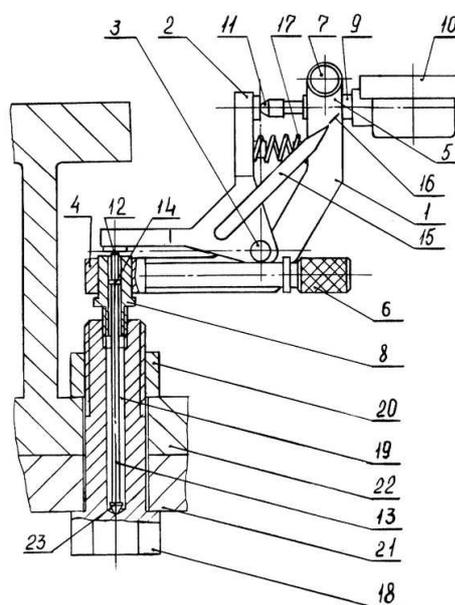


Рисунок 4 – К патенту РФ № 2160436

Недостатками метода измерений удлинения болта с помощью устройств, встроенные в тело болта (шпильки), является сложность их конструкций, затрудняющая практическое использование, особенно в случае большого количества РК, а также низкая надёжность их функционирования при динамическом нагружении.

*Метод мониторинга затяжки по углу поворота гайки и показаниям крутящего момента.* Метод мониторинга по углу поворота гайки осуществляют с помощью обычного ключа и специального шаблона. Метод прост, не связан с силами трения и не зависит от конструктивных особенностей РС, однако допускает значительную погрешность измерений до 20 % [1].

Метод мониторинга по крутящему моменту [32] осуществляют непосредственно с помощью динамометрических ключей (рис. 5, а, б).

Метод мониторинга по крутящему моменту применяется для относительно простых конструкций

РС машин и сооружений. Несмотря на простоту и низкую стоимость метода, вследствие значительных потерь на трение (до 90% крутящего момента тратится на сопротивление трению в резьбе, а также гайки по соединяемым деталям), метод обладает достаточно высокой погрешностью измерения - до 30% [1].



Рисунок 5 - Индикаторный (а) и электронный (б) динамометрические ключи

**Мониторинг затяжки на основе косвенной оценки.** Методы мониторинга затяжки РС на основе прямой оценки не обеспечивают достаточную степень точности, часто трудноосуществимы и не позволяют получать результаты измерений в системе реального времени. Это явилось причиной разработки косвенных методов мониторинга затяжки РС, где имеется связь напряжений в стержне болта (винта, шпильки) с каким-либо физическим параметром, например, скоростью/временем распространения акустического (ультразвукового - УЗ) сигнала, с анализом и прогнозированием изменения контролируемого параметра.

Мониторинг ТО, осуществляемый на основе взаимосвязи акустических сигналов с механическими напряжениями в деталях, называют акустической тензометрией. Основное преимущество акустической тензометрии заключается в возможности установки первичного датчика (пьезопреобразователя) на недеформированную поверхность (торец) резьбовой детали. При измерении скорости распространения УЗ-волн вдоль оси болта (винта, шпильки) преобразователь прижимают к торцу или головке болта и измеряют время прихода эхо-сигнала от противоположного торца в процессе затяжки болта. Важно сохранить постоянное положение преобразователя на болте во время измерений, чтобы не изменялась толщина контактного слоя между преобразователем и болтом.

Для РС применяют следующие методы акустической тензометрии: эхо-импульсный, собственных колебаний, импедансный.

Акустический эхо-импульсный метод мониторинга затяжки РС осуществляют согласно ГОСТ Р 52889-2007 [14], и в том числе - ответственных РК энергетического оборудования ТЭС, ГЭС, АЭС. Скорость ультразвука и величина напряжения в детали из изотропного металлического материала, согласно теории акустоупругости, связаны между собой нелинейной зависимостью. Применение эхо-импульсного метода определения затяжки РК пред-

ставлено в работах [33, 34].

Для определения трещин и усилий затяжки в РС применяют ультразвуковые приборы, например, измеритель BoltMike III (рис. 6) и дефектоскоп УД4-Т (рис. 7).



Рисунок 6 - Ультразвуковой измеритель BoltMike III



Рисунок 7 - Ультразвуковой дефектоскоп УД4-Т

Известны три разновидности эхо-импульсного метода для оценки усилия затяжки РС. Первый основан на измерении времени прохождения ультразвука вдоль болта; второй - на акустической тензометрии; третий - на регистрации сдвига резонансных частот.

1. *Метод измерения времени прохождения ультразвука.* Поле напряжений в РК, в соответствии с акустоупругим эффектом, влияет на скорость прохождения ультразвуковой волны. Измеряя время прохождения ультразвуковой волны (рис. 8) в незатянутом и затянутом РС, с учётом известного соотношения [35, 36] рассчитывают напряжение в стержне болта (винта, шпильки). В работе [37] этим методом определены усилия затяжки болтов турбинного оборудования ТЭС.

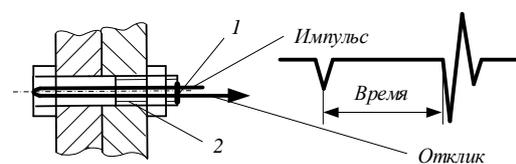


Рисунок 8 - Прохождение УЗ-сигнала от пьезодатчика 1 через болт 2

Основным преимуществом этого метода является его простота, теоретическая обоснованность и сопоставимость с экспериментами. Недостаток метода заключается в необходимости измерений и сравнении малых промежутков времени прохождения ультразвуковой волны в незатянутом и затянутом РС, в использовании высокоточного и дорогого оборудования, а также в трудности осуществления онлайн-мониторинга.

2. *Метод акустической тензометрии.* Из-за недостатков метода измерения времени прохождения ультразвука вдоль болта, связанного с необходимостью измерений в незатянутом и затянутом РС,

был предложен метод отношения скоростей продольных и сдвиговых волн под нагрузкой, с помощью которого можно оценить напряжение в стержне болта (винта, шпильки) [36]. Этот метод осуществляется также, как и метод измерения времени прохождения ультразвука, с той разницей, что нет необходимости разбирать или собирать РС. Кроме того, нет необходимости знать точную длину болта (винта, шпильки), а теоретические формулы не зависят от длины болтов и времени прохождения волн в нагруженном и ненагруженном состояниях. Развитием метода отношения скоростей продольных и сдвиговых волн является метод акустической тензометрии. Результаты исследований [38-40] показывают, что реализация метода акустической тензометрии вполне обеспечивается современными методами и технологией электромагнитно-акустического (ЭМА) возбуждения УЗ волн.

Метод акустической тензометрии в мониторинге усилий затяжки РС успешно применяется для энергетического оборудования ТЭС, ГЭС, АЭС, жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) аэрокосмических аппаратов и других ответственных сооружений.

**3. Метод сдвига резонансных частот.** Метод сдвига резонансных частот основан на возбуждении в ТО упругих ультразвуковых колебаний при плавном изменении их частоты. При совпадении частоты вынужденных колебаний с собственными частотами ТО возникает резонанс в системе «преобразователь – ТО». Изменение плотности стыка РС приводит к сдвигу резонансных частот, по которому можно оценить поле напряжений и, следовательно, затяжку РС.

Недостатком метода является необходимость использования дорогого оборудования с высокой чувствительностью измерения из-за имеющихся флуктуаций сдвига резонансных частот [41].

**Метод собственных колебаний** [42] основан на использовании упругих свойств колебательных систем, совершающих свободные и вынужденные колебания (рис. 9).

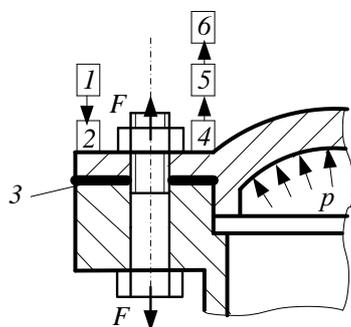


Рисунок 9 – Схема реализации метода собственных колебаний:

1 - генератор; 2 - вибратор; 3 - стык деталей соединения; 4 - приёмник; 5 - усилитель; 6 - спектроанализатор; F - сила от затяжки; p - давление среды стыка болтового соединения

Изменение плотности стыка деталей РС приводит к изменениям параметров колебания конструк-

ции. Выбор вида возбуждения колебания - единичными ударами, вибраторами или пьезоэлектрическими элементами зависит от размера конструкции и условий работы, а регистрация колебаний осуществляется с помощью пьезоэлектрического акселерометра или лазерного виброметра. Принятые сигналы анализируются с учетом времени, частоты, времени-частоты или частоты-времени.

Важным преимуществом вибрационных методов является простота их практической реализации и теоретической интерпретации. Однако основным их недостатком является зависимость интерпретации результатов экспериментов от квалификации оператора, особенно при мониторинге ослабления группы РС, когда существенно усложняется обработка сигнала вибраций. Кроме того, рассматриваемые методы обнаружения ослабления затяжки РС не позволяют получать результаты измерений в системе реального времени [43].

**Импедансный метод**, основанный на возбуждении в ТО упругих колебаний и анализе изменения механического импеданса (отношение возмущающей силы к вызываемой ею скорости колебания частиц среды в точке приложения силы) контролируемого участка поверхности ТО, впервые был предложен в работе [44]. Метод основан на регистрации изменений характера колебаний датчика, контактирующего с частью поверхности дефектного стыка РС, имеющего коррозию или нарушение сплошности [45]. Механический импеданс бездефектной части стыка РС имеет максимальное значение ( $Z_1 > Z_2$ ), с нарушением сплошности - существенно меньше (рис. 10).

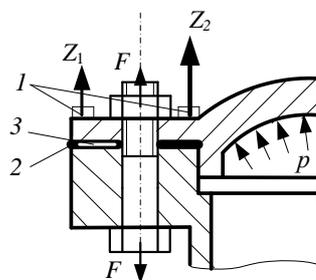


Рисунок 10 – Схема реализации метода импеданса:

1 - датчики; 2 - стык деталей; 3 - ослабление стыка;  $Z_1, Z_2$  - импеданс; F - сила от затяжки; p - давление среды стыка болтового соединения

Исследования, проведенные в [46, 47], показали, что сочетание метода импеданса с управляемыми ультразвуковыми волнами повышает эффективность мониторинга группы болтового соединения. Дистанционный сбор и передача данных мониторинга РС импедансным методом предложен в работе [48].

Несмотря на эффективность импедансного метода при обнаружении ослабления РС, следует отметить, что он не позволяет достаточно точно оценить потерю плотности стыка. Кроме того, мониторинг конструкций затруднен при большом количестве болтов и влиянии температуры окружающей среды, требует повышения точности регистрации сигналов [49]. Однако в работе [50] предложена усовершенст-

вованная модель механического импеданса для количественного мониторинга РС.

**Развитие акустического метода мониторинга затяжки РС.** Развитие акустического метода мониторинга затяжки РС обусловлено систематическими ошибками акустического метода, которые могут быть связаны с различием начальных упругих свойств деталей РК из-за технологического процесса их изготовления, включающего операции термической обработки, прокатки и др. В результате корреляционная зависимость времени распространения волны от механического напряжения может быть искажена. Поэтому поиск путей уменьшения влияния таких систематических ошибок является одной из наиболее важных проблем, которые необходимо решить для успешного применения метода акустоструности.

Один из интересных подходов к решению указанной проблемы состоит в предложении объединить процедуру затяжки с помощью гидравлического ключа с возможностями ультразвукового измерения напряжения, при котором процесс затяжки прекращается после достижения заданного напряжения [51]. Благодаря предлагаемому подходу можно избежать ошибок, связанных с трением в резьбовом соединении, которые являются традиционными для динамометрических ключей. Изменение времени распространения продольной волны определяется как напряжениями, так и удлинением болта в результате затягивания.

Необходимость разработки акустических методов контроля напряженно-деформированного состояния резьбовых соединений обосновывается в работе [52], где представлена разработка метода акустической тензометрии с использованием лазерно-ультразвуковой генерации, описаны результаты разработки специального оборудования, обеспечивающего повышение точности определения механических напряжений в резьбовом соединении.

Перспективное направление развития акустического метода мониторинга затяжки РС связывают с анализом нелинейных эффектов на стыке соединения и учётом субгармонического резонанса [53]. Несмотря на более высокую чувствительность нового метода к началу ослабления затяжки, возникает опасение в точности и надёжности измерений с помощью более сложного оборудования.

**Неакустические методы мониторинга затяжки РС.** *Мониторинг затяжки на основе остаточной намагниченности.* Мониторинг затяжки на основе остаточной намагниченности заключается в том, что на контролируемой поверхности болта (винта, шпильки) полюсом намагничивающего устройства стержневого типа создают локальную область с остаточной намагниченностью металла, измеряют нормальную составляющую напряженности поля остаточной намагниченности над серединой этой локальной области и по измеренному параметру магнитного поля определяют по предварительной экспериментально полученной зависимости величину механического напряжения стержня болта (винта, шпильки) [54].

По сравнению с известными акустическими способами предложенный мониторинг затяжки обеспечивает следующие преимущества: применимость для контроля уровня затяжки болтов или шпилек практически всех типоразмеров, возможность контроля механического напряжения на любой практически доступной точке поверхности стержня. Существенным достоинством этого метода является возможность оценки остаточного ресурса деталей РК, который может быть определён на основе предварительно установленной экспериментальной зависимости величины магнитного параметра от количества циклов её нагружения с помощью кривой усталости металла.

*Мониторинг затяжки болта (винта, шпильки) на основе волоконных датчиков* состоит в том, что в его стержне высверливают центральное отверстие, куда жестко крепят оптоволоконно сформированной в нем брэгговской отражающей решеткой-светофильтром, а уровень затяжки при монтаже и последующей эксплуатации измеряют по сдвигу длины волны настройки в отраженном либо проходящем свете широкополосного (немонохроматического) источника излучения [55–57]. Волоконный брэгговский элемент обеспечивает точный контроль растягивающей силы в болте без существенного влияния на его конструкцию при быстрой сборке и разборке датчика. Мониторинг затяжки на основе волоконных датчиков может быть легко адаптирован в условиях производства, обладает достаточной точностью измерения и контроля затяжки РС.

По сравнению с обычными тензодатчиками электрического сопротивления волоконные датчики проще установить в болт (винт, шпильку) с относительно минимальным воздействием на целостность его конструкции. Определённой сложностью отмеченного мониторинга следует признать температурное влияние окружающей среды и необходимость его компенсации, а также выбор пломбировочной смеси для волоконных датчиков.

*Мониторинг затяжки по деформации деталей РС.* Мониторинг затяжки РС по радиальной деформации гайки до определённой величины предложен в патенте РФ [58]. Способ контроля усилия затяжки РС осуществляют по результатам его испытания, для чего фиксируют болт, нагружают его осевой силой, фиксируют величину контролируемого параметра, соответствующего усилию затяжки при нагружении болта полной рабочей нагрузкой. Затяжку резьбового соединения при сборке изделий выполняют до достижения величины контролируемого параметра. Контроль усилия затяжки при испытании осуществляют по радиальной деформации гайки выборочных образцов из партии резьбовых соединений, которую фиксируют с помощью датчика радиальной деформации. Затяжку последующих резьбовых соединений этой партии при сборке изделий выполняют до достижения радиальной деформации гайки величины, равной величине, полученной при испытании выборочных образцов в момент полного нагружения болта, соответствующего заданному напряжению затяжки. В качестве устройства для осевого нагру-

жения и измерительного прибора для регистрации осевого нагружения используют разрывную испытательную машину. Датчик измерения радиальной деформации устанавливают при испытании образцов и при сборке резьбовых соединений в непосредственной близости от опорного торца гайки.

Недостатком рассмотренного способа является сложность его осуществления и регистрации малых радиальных деформаций гайки.

В работе [59] предлагается способ контроля усилия затяжки РС по деформации головки болта под осевой нагрузкой. Прогиб головки болта изучается с помощью аналитического, численного (МКЭ) и экспериментального (вихретоковый) методов. В аналитическом методе головка болта рассматривается как толстая шарнирно опертая пластина с равномерно распределённой нагрузкой, для которой находят прогибы. Методом конечных элементов уточняют распределение нагрузки и контакт с опорной поверхностью головки, а также влияние размеров и жесткости головки болта на её деформацию, геометрических дефектов, допусков размеров, эксцентричное расположение шайбы, отклонение положения головки болта относительно оси.

Рассмотренный метод применим только для мониторинга затяжки РС в процессе его монтажа. В эксплуатации мониторинг затяжки затруднён из-за ржавчины, пыли и грязи, отложившихся на поверхности болта. Недостатками метода считают существенное влияние на измерения точности установки и надёжность крепления вихретокового датчика, а также необходимость применения достаточно сложной и дорогостоящей аппаратуры.

*Мониторинг затяжки по визуализации положения РК.* Предлагается бесконтактный метод обнаружения ослабления затяжки РС, основанный на визуализации различных положений резьбовых деталей с использованием цифровой камеры [60]. Фиксируются, сопоставляются и анализируются изображения контролируемых деталей РК в различные периоды работы. Отличия изображений резьбовых деталей в контрольные моменты времени служат признаком ослабления затяжки РС. В работе [61] представлена методика обнаружения ослабления РС с использованием информации об изображении РК в стальных мостах. Алгоритм реализации методики состоит из следующих этапов: фотографирование болтового соединения, сегментирование изображений для идентификации деталей РК, определение угла поворота каждой гайки и определения ослабления затяжки.

Преимуществами мониторинга затяжки по визуализации положения РК являются бесконтактность, низкая стоимость, простота реализации.

Недостатками метода является то, что условия освещения и положения камеры должны быть одинаковыми в течение различных периодов проверки для того, чтобы не было ошибки при регистрации изображений. Кроме того, метод не может точно регистрировать повороты деталей РК.

**Рекомендации по применению методов мониторинга РК турбинного оборудования на ТЭС,**

## **АЭС, ГЭС.**

1. Надёжный мониторинг зарождения микротрещин в деталях РС осуществляется методом акустической эмиссии (АЭ) в режиме реального времени, в основе которого лежат зависимости между характеристиками образовавшихся дефектов и параметрами излучаемых ими волн.

2. Для выявления появившихся трещин в РК применяют методы неразрушающего контроля – магнитопорошковый, электромагнитный, капиллярный, ультразвуковой. Перспективным следует считать ультразвуковой метод неразрушающего контроля, имеющий ряд преимуществ перед остальными: возможность контроля болтов в сборке, относительная простота реализации, небольшие экономические затраты. Наиболее эффективно выявление трещин в деталях РК осуществляют ультразвуковым эхо-импульсным методом.

3. Мониторинг затяжки РС в процессе монтажа и эксплуатации осуществляют прямыми и косвенными методами. В случае прямых методов: угол поворота гайки – прост в исполнении, однако не пригоден для соединений с короткими болтами, так как его расчетная величина мала и погрешности метода сказываются в наибольшей степени; метод мониторинга крутящего момента, основанный на измерении вращающего момента с помощью проградуированных ключей, не эффективен для крупногабаритных РС. Из косвенных методов акустические имеют преимущественное предпочтение по критериям высокой чувствительности и достоверности обнаружения дефектов, оперативности и производительности, меньшей стоимости и безопасности в работе.

4. Выбирая наиболее эффективный метод мониторинга крупного РК турбинного оборудования на ТЭС, АЭС, ГЭС для оценки и прогнозирования ослабления затяжки и разрушения резьбовых деталей, следует учитывать ряд факторов: конструкцию РС, требования к надежности, качество изготовления, окружающие условия, квалификацию персонала, точность, стоимость и возможность непрерывности контроля.

5. Мониторинг затяжки крупного РК энергетического оборудования в процессе его монтажа и эксплуатации следует осуществлять методом акустической тензометрии. Регламентируемый стандартом, метод может быть использован при сборке в процессе производства, монтаже, пусконаладочных и ремонтных работах в ходе эксплуатации ответственных конструкций в промышленности и других отраслях. Дальнейшее развитие метода, оборудования и технологии акустической тензометрии видится в расширении применения информационных технологий, интеллектуализации процесса контроля и применения методов возбуждения УЗК без технологических промежуточных сред.

6. Наиболее эффективным методом определения зарождения микротрещин в деталях РС является метод акустической эмиссии (АЭ). Выявление трещин в деталях эксплуатируемых РС осуществляют с помощью ультразвукового эхо-импульсного метода

НА ОСНОВЕ ГОЛОВНЫХ ВОЛН.

## Список литературы

- Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. *Резьбовые и фланцевые соединения*. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
- Saccese, V., Mewer, R., Vel, S. S. Detection of bolt load loss in hybrid composite/metal bolted connections. *Engineering Structures*, 2004. 26(7), pp. 895–906.
- Jiang, Y.; Zhang, M.; Lee, C. A study of early stage self-loosening of bolted joints. *J. Mech. Des.* 2003, 125, 518–526.
- Перевалов С.П., Апахов М.И. Выявление трещин в резьбовой части крепежа ультразвуковым методом. *Дефектоскопия*. 1986. № 4. С. 24–31.
- Bickford, J. *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. Non-Gasketed Joints. Fourth Edition*. New York. 2008. 505 p.
- Не разрушающий контроль*. Том 3. Справочник. Под общ. ред. В.В. Клюева, И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. Издание 2-е. М.: Машиностроение, 2008. 864 с.
- ГОСТ 23829-85. *Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения*. М.: Издательство стандартов, 1986.
- Иванов В.И., Барат В.А. *Акустико-эмиссионная диагностика: справ.* М.: Издательский дом «Спектр», 2017. 368 с.
- Ермолов И. Н. *Теория и практика ультразвукового контроля*. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
- Способ ультразвукового контроля трещин в деталях соединений*. по а.с. СССР № 602849 G01N 29/04 от 31.03.78.
- Способ контроля процесса зарождения и роста усталостных трещин в резьбовых соединениях изделий стержневого типа и устройство для его осуществления* по а.с. СССР № 1379712 G01N 27/90 от 07.03.1988.
- Ушаков В. М., Давыдов Д. М., Доможиров Л. И. Исследование кинетики роста усталостных трещин с применением метода ультразвуковых рэлеевских волн. *Дефектоскопия*. 2012. № 6. С. 3–10.
- Lamy C. A. Rebello and Charlier J. Surface Crack Siring Related to the Stress State by and Ultrasonic Time-of-flight Technique. *INSIGHT*. 1998, V. 40, № 6. P. 421–428.
- ГОСТ Р 52889-2007. *Акустический метод контроля усилия затяжки резьбовых соединений. Общие требования*. М.: Стандартинформ, 2009. 11 с.
- Разыграев Н.П. Некоторые особенности ультразвукового контроля головными волнами. *Дефектоскопия*. 1982. № 6. С. 36–42.
- Ушаков В.М., Давыдов Д.М., Михалёв В.В. Состояние и перспективы неразрушающего контроля крепежных изделий Фланцевых соединений энергетического оборудования. *Контроль. Диагностика*. 2015, № 10. С. 61–66.
- ГОСТ Р 54786–2011. *Крепежные изделия для разъемных соединений атомных энергетических установок. Технические условия*. М.: Стандартинформ, 2011. 26 с.
- ГОСТ 23304–78. *Болты шпильки, гайки и шайбы для фланцевых соединений атомных энергетических установок. Технические требования. Приемка. Методы испытаний. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение*. М.: Госстандарт, 1978. 42 с.
- РД ЭО 0142–99. *Методика ультразвукового контроля шпилек фланцевых разъемов оборудования АЭС* (актуализирована в 2013 г.). М.: Росэнергоатом, 2013. 37 с.
- РД 39.17.415–96. *Инструкция по проведению ультразвукового контроля крепежа энергооборудования*. М.: ОРГРЭС, 1997. 12 с.
- Временная инструкция по проведению ультразвукового контроля шпилек гидроагрегатов ГЭС*. М.: ЦНИИТМАШ, 2010. 10 с.
- Михалев В. В., Давыдов Д. М., Шишкин С. В. Опыт ультразвукового контроля шпилек крепления крышек гидроагрегатов ГЭС. *Дефектоскопия*. 2011. № 4. С. 50–56.
- ГОСТ Р 54786-2011. *Крепежные изделия для разъемных соединений атомных энергетических установок. Технические условия*. М.: Стандартинформ, 2012. 32 с.
- Бузлаев Д. Моделирование болтовых соединений в КЭ-комплексе SIMULIA Abaqus. / САПР. Спецвыпуск. Май/2015. С. 2-7.
- Каратушин С.И., Храмова Д.А., Бокучава П.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния болтовых соединений в среде ANSYS. *Изв. высш. уч. зав. Машиностроение*, 2018. № 11. С. 11–18.
- Трубаев А. И., Степченко А. С., Водка А. А. Исследование напряженно-деформированного состояния болтовых соединений рабочего колеса гидротурбины. *Вісник НТУ «ХП»*. Тем. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків: НТУ «ХП», 2011. № 52. С. 34–41.
- Paolola Z., Curtarello A., Maiorano E., Pellegrino C. Numerical analyses of corroded bolted connections. *Procedia Structural Integrity*, V.5, 2017, P. 592-599.
- Иосилевич Г.Б., Г.Б. Строганов, Шарловский Ю.В. *Затяжка и стопорение резьбовых соединений: Справочник*. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
- Struik, J., Oyeledun, A., Fisher, J. 1973. Bolt Tension Control with a Direct Tension Indicator. *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction*, vol. 10, pp. 1–5.
- Пат. 2296307 Российская Федерация, МПК G 01L5/24. Устройство для контроля усилия затяжки резьбового соединения / Иванов А. И., Кияткин А. Е., Лупша В. А.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" - ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ" (RU).— № 2005134349/28; заявл. 07.11.2005; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9–3с.
- Пат. 2160436 Российская Федерация, МПК G 01L 5/24. Устройство для контроля усилия затяжки резьбового соединения / Жданов О.Н., Толмачев С.М., Эрохо Е.Э.; заявитель и патентообладатель: Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева; заявл. 24.02.1999; опубл. 20.12.2000, Бюл. № 3–4с.
- Guan, T. 2009. Analysis of high-strength fastener fastening. *Equipment Manufacturing Technology*, vol. 4, pp. 163–171.
- Chaki, S., Comeloup, G., Lillamand, I., & Walaszek, H., 2006. Non-destructive control of bolt tightening: absolute and differential evaluation. *Materials Evaluation*, 64(6), pp. 629-633.
- Chaki, S., Comeloup, G., Lillamand, I., & Walaszek, H., 2007. Combination of Longitudinal and Transverse Ultrasonic Waves for In Situ Control of the Tightening of Bolts. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 129(3).
- Johnson, G. C., Holt, A. C. & Cunningham, B., 1996. An ultrasonic method for determining axial stress in bolts. *Journal of test and evaluation*, 14(5), pp. 253-259.
- Бобренко В.М., Рудаков А.С. Исследование усилий в резьбовых соединениях акустическим тензометрированием. *Дефектоскопия*, 1986. № 7. С.11-14.
- M. Suda, Y., Hasuo, A., Kanaya, Y., Ogura, T., Takishita, Y., Suzuki, Y. Development of ultrasonic axial bolting force in spection system for turbine bolts in thermal power plants. *JSME International Journal*, vol.35, no.2, pp. 216–219, 1992.
- Бобренко В. М., Бобров В. Т., Гульшин А. В. Метод и технология тензометрии разъемных соединений ответственных конструкций в условиях производства, монтажа и эксплуатации. *MEGATECH: Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности*. 2010. № 6. С. 8–20.
- Бобренко В. М., Бобров В. Т., Гульшин А. В. Анализ нагруженности разъемных соединений акустическим методом. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. № 7. С. 60–69.
- Клюев В. В., Бобренко В. М., Бобров В. Т. Акустическая тензометрия разъемных соединений. Состояние и перспективы развития. Ч. 2. Результаты исследований, создания оборудования, разработки методики и примеры применения акустической тензометрии. *Контроль. Диагностика*. 2016. № 2. С. 14–26.
- Wang, T., Song, G., Wang, Z., Li, Y. 2013. Proof-of-concept study of monitoring bolt connection status using a piezoelectric based active sensing method. *Smart Materials and Structures*, 22(8).
- Milanesi, A. et al., 2008. Modeling and Detection of Joint Loosening using Output-Only Broad-Band Vibration Data. *Structural Health Monitoring*. 7(4), pp. 309-328.
- He, K., Zhu, W. 2014. Detecting Loosening of Bolted Connections in a Pipeline Using Changes in Natural Frequencies. *Journal of Vibration and Acoustic*, 136(3).
- C. Liang, F. Sun, C. Rogers. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems - determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol.5, no. 1, pp.12–20, 1994.
- Bhalla, C. S. S. 2004. Structural Health Monitoring by Piezoelectric Transducers. I: Modelling. *Journal of Aerospace Engineering*, 14(4), pp. 154–165.
- Wait, J., Park, G., Farrar, C. 2005. Integrated structural health assessment using piezoelectric active sensors, *Shock and Vibration*, vol.12, no. 6, pp. 389–405.
- An Y., Sohn, H., 2012. Integrated impedance and guided wave based damage detection. *Mechanical Systems and signal processing*, vol. 28, pp. 50-62.
- Mascarenas, D., Farinholt, K., Todd, M., Farrar, C. A low-power wireless sensing device for remote inspection of bolted joints. *Journal of Aerospace Engineering, Part G of the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2009. 223(5): p. 565-575.

49. Hong, D., Nguyen, K., Lee, I., Kim, J. 2012. Temperature-compensated damage monitoring by using wireless acceleration-impedance sensor nodes in steel girder connection. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2012, 12 pages.
50. Wang, F., Ho, M., Huo, L., Song, G. 2018. Novel Fractal Contact-EMI Model for Quantitative Monitoring of Bolted Joint Looseness. *IEEE*, V. 6: p. 40212-40220.
51. Иванов, А.С., С.В. Муркин, Н.И. Смирнов, Ермолаев М.М. Влияние пластических деформаций микронеровностей на ослабление затяжки резьбовых соединений погруженных центробежных насосов. *ТвГТУ. Межвуз. сб. научн. трудов*. 2014. Вып. 8. С. 27-31.
52. Marusina, M., Fedorov, A., Prokhorovich, V., Berkutov, I., Bychenok, V., Tkacheva, N., Mayorov, A. Development of Acoustic Methods of Control of the Stress-Strain State of Threaded Connections. *Measurement Techniques*, June 2018, Vol. 61, No. 3, pp. 297–302.
53. Zhang, M., Shen, Y., Li, X., Qu, W. Application of subharmonic resonance for the detection of bolted joint looseness. *Nonlinear Dynamics*, 2017.
54. Пат. 2456562 Российская Федерация, МПК G 01L 5/24. Способ контроля уровня затяжки стального болта или шпильки / Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р.; заявитель и патентообладатель: Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р.; заявл. 22.02.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20 – 7 с.
55. Li, H., Zhou, G., Ren, L., Li, D. 2009. Strain transfer coefficient analyses for embedded fiber bragg grating sensor in different host materials. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 135, no. 12, pp.1343–1353.
56. Khomenko, A., Koricho, E., Haq, M., Cloud, G. Bolt tension monitoring with reusable fiber Bragg-grating sensors. *Journal of Strain Analysis*, 2016, Vol. 51(2), p. 101–108.
57. Пат. 2616732 Российская Федерация, МПК G 01L 5/24. Способ контроля уровня затяжки болта или шпильки / Бураевская Е. В., Гришанов В. Н., Кузнецов В. А.; заявитель и патентообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева" (национальный исследовательский университет) (СГАУ); заявл. 05.11.2015; опубл. 18.04.2017. Бюл. № 11. 5 с.
58. Пат. 2401424 Российская Федерация, МПК G 01L 5/24. Способ контроля усилия затяжки резьбовых соединений / Максак В. И., Цхай Э. Б.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный архитектурно-строительный университет" (ГОУВПО"ТГАСУ"); заявл. 01.09.2009; опубл. 10.10.2010. Бюл. № 28 – 9 с.
59. Horvath, P., Toth, P. 2018. Nondestructive Bolt Preload Measurement. *Athens Journal of Technology and Engineering*. Vol. 5, No. 2, p. 91–110.
60. Kong, X., Li, J. Image Registration-Based Bolt Loosening Detection of Steel Joints. *J. Sensors*, March 2018, 18.
61. Park, J., Kim, T., Kim, J. Image-based Bolt-loosening Detection Technique of Bolt Joint in Steel Bridges. *6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering 11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*. August 1-2, 2015.
- Mashinostroenie, 1981. 240 p.
10. *Sposob ul'trazvukovogo kontrolya treshhin v detalyakh soedinenij po a.s. SSSR # 602849 G01N 29/04* ot 31.03.78.
11. *Sposob kontrolya protsessa zarozhdeniya i rosta ustalostnykh treshhin v rez'bovykh soedineniyakh izdelij sterzhnovego tipa i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya* po a.s. SSSR # 1379712 G01N 27/90 ot 07.03.1988.
12. Ushakov V. M., Davy'dov D. M., Domozhrov L. I. Issledovanie kinetiki rosta ustalostnykh treshhin s primeneniem metoda ul'trazvukovykh re'levskikh voln. *Defektoskopiya*. 2012, no. 6, pp. 3–10.
13. Lamy C. A. Rebello and Charlier J. Surface Crack Siring Related to the Stress State by and Ultrasonic Time-of-flight Technique. *INSIGHT*. 1998. Vol. 40, no. 6, pp. 421–428.
14. GOSTR 52889-2007. *Akusticheskij metod kontrolya usiliya zatyazhki rez'bovykh soedinenij. Obshhie trebovaniya*. M.: Standartinform, 2009. 11 p.
15. Razy'graev N.P. Nekotory'e osobennosti ul'trazvukovogo kontrolya golovny'mi volnami. *Defektoskopiya*. 1982., no. 6, pp. 36-42.
16. Ushakov V.M., Davy'dov D.M., Mikhalyov V.V. Sostoyanie i perspektivy nerazrushayushhego kontrolya krep'yoznykh izdelij Flanczevykh soedinenij e'nergeticheskogo oborudovaniya. *Kontrol'. Diagnostika*. 2015, no. 10, pp. 61-66.
17. GOST R 54786–2011. *Krepezhny'e izdeliya dlya raz'emnykh soedinenij atomnykh e'nergeticheskikh ustanovok. Tekhnicheskije usloviya*. M.: Standartinform, 2011. 26 p.
18. GOST 23304–78. *Bolty shpil'ki, gajki i shajby dlya flanczevykh soedinenij atomnykh e'nergeticheskikh ustanovok. Tekhnicheskije trebovaniya. Priemka. Metody ispytaniy. Markirovka, upakovka, transportirovanie i khranenie*. M.: Gosstandart, 1978. 42 p.
19. RD E'O 0142–99. *Metodika ul'trazvukovogo kontrolya shpil'lek flanczevykh raz'emov oborudovaniya AЕS (aktualizirovana v 2013 g.)*. M.: Rose'nergoatom, 2013. 37 p.
20. RD 39.17.415–96. *Instrukciya po provedeniyu ul'trazvukovogo kontrolya krepezha e'nergooborudovaniya*. M.: ORGRE'S, 1997. 12 p.
21. *Vremennaya instrukciya po provedeniyu ul'trazvukovogo kontrolya shpilek gidroagregatov GE'S*. M.: CzNIITMASH, 2010. 10 p.
22. Mikhalev V. V., Davy'dov D. M., Shishkin S. V. Opyt ul'trazvukovogo kontrolya shpilek krep'leniya kryshek gidroagregatov GE'S. *Defektoskopiya*. 2011, no. 4, pp. 50–56.
23. GOST R 54786-2011. *Krepezhny'e izdeliya dlya raz'emnykh soedinenij atomnykh e'nergeticheskikh ustanovok. Tekhnicheskije usloviya*. M.: Standartinform, 2012. 32 p.
24. Buzlaev D. Modelirovanie boltovykh soedinenij v KE-komplekse SIMULIA Abaqus. SAPR. Specz vy'pusk. Maj/2015., pp. 2-7.
25. Karatushin S.I., Khranova D.A., Bokuchava P.N. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya boltovykh soedinenij v srede ANSYS. *Izv.vy'ssh. uch. zav. Mashino-stroenie*, 2018, no. 11, pp. 11-18.
26. Trubaev A. I., Stepchenko A. S., Vodka A. A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya boltovykh soedinenij rabochego koleasa gidroturbiny. *Vi'snik NTU «KhPI». Tematichnij vipusk: Dinamika i mitsni'st mashin*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2011, no. 52, pp. 34-41.
27. Paola Z., Curtarello A., Maioranab E., Pellegrino C. Numerical analyses of corroded bolted connections. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol.5, pp. 592-599.
28. Iosilevich G.B., G.B. Stroganov, Sharlovskij Yu.V. *Zatyazhka i stoporenie rez'bovykh soedinenij: Spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1985. 224 p.
29. Struik, J., Oyeledun, A., Fisher, J. 1973. Bolt Tension Control with a Direct Tension Indicator. *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction*, vol. 10, pp. 1–5.
30. Pat. 2296307 Rossijskaya Federacziya, MPK G 01L5/24. Ust-rojstvo dlya kontrolya usiliya zatyazhki rez'bovogo soedineniya / Ivanov A. I., Kiyatkin A. E., Lupsha V. A.; заявитель и патентообладатель: Federal'noe gosudarstvennoe unitar'noe predpriyatie "Rossijskij federal'nyj yadernyj tsentr - Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut e'ksperimental'noj fiziki" - FGUP "RFYaCz-VNIIE" (RU). № 2005134349/28; заявл. 07.11.2005; опубл. 27.03.2007, Byul. no. 9 – 3s.
31. Pat. 2160436 Rossijskaya Federacziya, MPK G 01L 5/24. Ust-rojstvo dlya kontrolya usiliya zatyazhki rez'bovogo soedineniya / Zhdanov O.N., Tolmachev S.M., E'zrokho E.E.; заявитель и патентообладатель: Gosudarstvennyj kosmicheskij nauchno-proizvodstvennyj tsentr im. M.V. Khrunicheva; заявл. 24.02.1999;

## References (transliterated)

- Birger I. A., Iosilevich G. B. *Rez'bovy'e i flanczevy'e soedineniya*. M.: Mashinostroenie, 1990. 368 p.
- Caccese, V., Mewer, R., Vel, S. S. Detection of bolt load loss in hybrid-composite/metal bolted connections. *Engineering Structures*, 2004. 26(7), pp. 895–906.
- Jiang, Y.; Zhang, M.; Lee, C. A study of early stage self-loosening of bolted joints. *J. Mech. Des.* 2003, 125, 518–526.
- Perevalov S.P., Apakhov M.I. Vy'yavlenie treshhin v rez'bovoj chasti krepezha ul'trazvukovy'm metodom. *Defektoskopiya*, 1986, no. 4, pp. 24 - 31
- Bickford, J. *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. Non-Gasketed Joints. Fourth Edition*. New York. 2008. 505 p.
- Nerazrushayushhij kontrol'*. Tom 3. Spravochnik. Pod obshh. red. V.V. Klyueva. I.N. Ermolov, Yu.V. Lange. Ul'trazvuko-voj kontrol'. 2008. Izdanie: 2-e. M.: Mashinostroenie, 864 p.
- GOST 23829-85. *Kontrol' nerazrushayushhij akusticheskij. Terminy i opredeleniya*. M.: Izdatel'stvo standartov, 1986.
- Ivanov V.I., Barat V.A. *Akustiko-e'missionnaya diagnostika: sprav.* M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2017. 368 p.
- Ermolov I. N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya*. M.:

- opubl. 20.12.2000, Byul. no. 3. 4 p.
32. Guan, T. 2009. Analysis of high-strength fastener sfastening. *Equipment Manufacturing Technology*, vol. 4, pp. 163–171.
  33. Chaki, S., Corneloup, G., Lillamand, I., & Walaszek, H., 2006. Non-destructive control of bolt tightening: absolute and differential evaluation. *Materials Evaluation*, 64(6), pp. 629-633.
  34. Chaki, S., Corneloup, G., Lillamand, I., & Walaszek, H., 2007. Combination of Longitudinal and Transverse Ultrasonic Waves for In Situ Control of the Tightening of Bolts. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 129(3).
  35. Johnson, G. C., Holt, A. C. & Cunningham, B., 1996. An ultrasonic method for determining axial stress in bolts. *Journal of test and evaluation*, 14(5), pp. 253-259.
  36. Bobrenko V.M., Rudakov A.S. Issledovanie usilij v rez`bovy`kh soedineniyakh akusticheskim tenzometrirovaniem. *Defektoskopiya*, 1986, no. 7, pp.11-14.
  37. M. Suda, Y., Hasuo, A., Kanaya, Y., Ogura, T., Takishita, Y., Suzuki, Y. Development of ultrasonic axial bolting force in spection system for turbine bolts in thermal power plants. *JSME International Journal*, 1992, vol.35, no.2, pp. 216–219,
  38. Bobrenko V. M., Bobrov V. T., Gul`shin A. V. Metod i tekh-nologiya tenzometrii raz`emny`kh soedinenij otvet-stvenny`kh konstrukcij v usloviyakh proizvodstva, montazha i e`kspluataczii. *MEGATECH: Novy`e tekhnologii v promy`shlennoj diagnostike i bezopasnosti*. 2010, no. 6, pp. 8–20.
  39. Bobrenko V. M., Bobrov V. T., Gul`shin A. V. Analiz nagruzhennosti raz`emny`kh soedinenij akusticheskim metodom // Zavodskaya laboratoriya. *Diagnostika materialov*. 2014. T. 80. no. 7., pp. 60 – 69.
  40. Klyuev V. V., Bobrenko V. M., Bobrov V. T. Akusticheskaya tenzometriya raz`emny`kh soedinenij. Sostoyanie i perspektivy` razvitiya. Ch. 2. Rezul`taty` issledovanij, sozdaniya oborudovaniya, razrabotki metodiki i primery` primeneniya akusticheskoy tenzometrii. *Kontrol`. Diagnostika*. 2016, no. 2, pp. 14–26.
  41. Wang, T., Song, G., Wang, Z., Li, Y. 2013. Proof-of-concept study of monitoring bolt connection status using a piezoelectric based active sensing method. *Smart Materials and Structures*, 22(8).
  42. Milanese, A. et al., 2008. Modeling and Detection of Joint Loosen-ing using Output-Only Broad-Band Vibration Data. *Structural Health Monitoring*, 7(4), pp. 309-328.
  43. He, K., Zhu, W. 2014. Detecting Loosening of Bolted Connections in a Pipeline Using Changes in Natural Frequencies. *Journal of Vibration and Acoustic*, 136(3).
  44. C. Liang, F. Sun, C. Rogers. Coupled electro-mechanical analysis of adap-tive material systems - determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol.5, no. 1, pp.12–20, 1994.
  45. Bhalla, C. S. S. 2004. Structural Health Monitoring by Piezoimpedance Transducers. I: Modelling. *Journal of Aerospace Engineering*, 14(4), pp. 154–165.
  46. Wait, J., Park, G., Farrar, C. 2005. Integrated structural health assessment using piezoelectric active sensors, *Shock and Vibration*, vol.12, no. 6, pp. 389–405.
  47. An, Y., Sohn, H., 2012. Integrated impedance and guided wave based damage detection. *Mechanical Systems and signal processing*, V. 28, pp. 50-62.
  48. Mascarenas, D., Farinholt, K., Todd, M., Farrar, C. A low-power wireless sensing device for remote inspection of bolted joints. *Journal of Aerospace Engineering, Part G of the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2009. 223(5): p. 565-575.
  49. Hong, D., Nguyen, K., Lee, I., Kim, J. 2012. Temperature-compensated damage monitoring by using wireless acceleration-impedance sensor nodes in steel girder connection. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2012, 12 p.
  50. Wang, F., Ho, M., Huo, L., Song, G. 2018. Novel Fractal Contact-EMI Model for Quantitative Monitoring of Bolted Joint Looseness. *IEEE*, V. 6: p. 40212-40220.
  51. Ivanov, A.S., S.V. Murkin, N.I. Smimov, M.M. Ermolaev Vliyanie plasticheskikh deformaczij mikrone-rovnostej na oslablenie zatyazhki rez`bovy`kh soedinenij pogruzhenny`kh czentrobezhny`kh nasosov. *TvGTU. Mezhevuz. sb. nauchn. trudov*, 2014, no. 8, pp. 27-31.
  52. Marusina, M., Fedorov, A., Prokhorovich, V., Berkutov, I., Bychenok, V., Tkacheva, N., Mayorov, A. Development of Acoustic Methods of Control of the Stress-Strain State of Threaded Connections. *Measurement Techniques*, Vol. 61, No. 3, June 2018, pp. 297-302.
  53. Zhang, M., Shen, Y., Li, X., Qu, W. Application of subharmonic resonance for the detection of bolted joint looseness. *Nonlinear Dynamics*, October 2017.
  54. Pat. 2456562 Rossijskaya Federaczija, MPK G 01L 5/24. Sposob kontrolya urovnya zatyazhki stal`nogo bolta ili shpil`ki / Zagidulin R. V., Zagidulin T. R.; zayavitel` i pa-tentoobladatel`: Zagidulin R. V., Zagidulin T. R; zayavl. 22.02.2011; opubl. 20.07.2012, Byul. no. 20. 7 p.
  55. Li, H., Zhou, G., Ren, L., Li, D. 2009. Strain transfer coefficient analyses for embedded fiber bragg grating sensor sin different host materials. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 135, no. 12, pp.1343–1353.
  56. Khomeenko, A., Koricho, E., Haq, M., Cloud, G. Bolt tension monitoring with reusable fiber Bragg-grating sensors. *Journal of Strain Analysis*, 2016, vol. 51(2), pp. 101–108.
  57. Pat. 2616732 Rossijskaya Federaczija, MPK G 01L 5/24. Sposob kontrolya urovnya zatyazhki bolta ili shpil`ki / Bur-naevskaya E. V., Grishanov V. N., Kuznecov V. A.; zayavitel` i patentoobladatel`: federal`noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego obrazovaniya "Samarskij gosudarstvenny`j a`erokosmicheskij universitet imeni akademika S.P. Koroleva" (nacional`ny`j issledovatel`skij universitet)" (SGAU); zayavl. 05.11.2015; opubl. 18.04.2017. Byul. no. 11. 5 p.
  58. Pat. 2401424 Rossijskaya Federaczija, MPK G 01L 5/24. Sposob kontrolya usiliya zatyazhki rez`bovy`kh soedinenij / Maksak V. I., Czkhaj E. B.; zayavitel` i patentoobladatel`: Gosudarstvennoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego professional`nogo obrazovaniya "Tomskij gosudarstvenny`j arkhitektumo-stroitel`ny`j universitet" (GOUV-PO"TGASU"); zayavl. 01.09.2009; opubl. 10.10.2010. Byul. no. 28. 9 p.
  59. Horvath, P., Toth, P. 2018. Nondestructive Bolt Preload Measurement. *Athens Journal of Technology and Engineering*. Vol. 5, no. 2, pp. 91–110.
  60. Kong, X., Li, J. Image Registration-Based Bolt Loosening Detection of Steel Joints. *J. Sensors*, March 2018, 18.
  61. Park, J., Kim, T., Kim, J. Image-based Bolt-loosening Detection Technique of Bolt Joint in Steel Bridges. *6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering 11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*. August 1-2, 2015.

Посмьнуа (received) 05.10.2020

#### Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

**Гайдамака Анатолій Володимирович (Гайдамака Анатолій Володимирович, Anatoly Gaydamaka)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, завідувач кафедрою “Деталі машин та мехатронних систем”, м. Харків, Україна; e-mail: gaydamaka.doc@gmail.com

**Музикін Юрій Дмитрович (Музыкин Юрий Дмитриевич, Yuri Muzykin)** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри “Деталі машин та мехатронних систем”, м. Харків, Україна; e-mail: muzykin1940@mail.ru

**Татьков Володимир Вікторович (Татьков Владимир Викторович, Vladimir Tat'kov)** – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідної частини Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, Україна; e-mail: tatjkov@kpi.kharkov.ua

**Бородін Дмитро Юрійович (Бородин Дмитрий Юрьевич, Dmytro Borodin)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, доцент кафедри “Деталі машин та мехатронних систем”, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2105-023X>; e-mail: dimitriy.graf@gmail.com