

УДК 621.55.01.81,658.58

DOI 10.18698/0536-1044-2016-5-74-83

# К вопросу оценки результатов измерений и их обработки в целях получения информации о функционировании машин и механизмов\*

**В.И. Пронякин**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## On the Assessment of Measurement Results and Their Interpretation to Obtain Information on the Operation of Machines and Mechanisms

**V.I. Pronyakin**BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: vip-u@yandex.ru

**i** Разработка методов получения измерительной информации и ее обработки в заданных целях (для оценки текущего технического состояния циклических машин и механизмов (ЦММ), аварийной защиты, задач исследования функционирования технических объектов, управления и др.) является актуальной проблемой. В настоящее время применяют различные методы получения информации, что свидетельствует об отсутствии единого подхода к решению задач технической диагностики ЦММ. Например, широко используемые амплитудные методы не обеспечивают надежного выявления устойчивых характеристик для оценки функционирования механических и электро-механических систем, определения зарождающихся дефектов и аварийной защиты. Экспертные оценки носят субъективный характер и зависят от профессионального уровня специалистов, не обеспечивая принятия надежных оперативных решений для выполнения управляющих воздействий и аварийной защиты. Предложен новый фазохронометрический метод получения информации о функционировании ЦММ на базе единого комплекса технических средств прецизионной хронометрии и математического моделирования. Фазохронометрический метод обеспечивает более высокий метрологический уровень и взаимосвязь между результатами измерений и их обработки с элементами функционирующего механизма, а также решение на более высоком уровне задачи оценки функционирования ЦММ.

**Ключевые слова:** фазохронометрический метод, прецизионная хронометрия, информационно-метрологическое сопровождение, техническая диагностика, математическое моделирование, дефект.

**i** The development of methods for obtaining and interpreting measurement data for specific purposes such as the assessment of current technical condition of cyclic machines and mechanisms (CMM), emergency protection, research into the operation of technical installations, control issues, etc. is a topical problem. At present, various methods are used to obtain the data, which indicates the absence of a unified approach to solving problems of

\* Работа поддержана в рамках НИР по выполнению проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Задание № 9.1265.2014/К и Задания № 2014/104 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ.

CMM technical diagnostics. For example, commonly used amplitude methods do not provide reliable detection of resistant characteristics to assess the functioning of mechanical and electromechanical systems, and the determination of incipient defects and emergency protection. Expert assessments are subjective and depend on the professional level of the specialists, not allowing the adoption of reliable operational solutions to implement control measures and emergency protection. A new phase-chronometric method is proposed for obtaining information on the functioning of CMMs based on a unified complex of precision chronometry devices and mathematical modelling. The phase-chronometric method provides a higher level of metrology and a relationship between the measurement and processing results, and the functioning mechanism elements. This method can also be used to solve problems of the CMM functioning assessment at a higher level.

**Keywords:** phase-chronometric method, precision time measurement, information and metrological support, technical diagnostics, mathematical modeling, defect.

Важной задачей при оценке работы циклических машин и механизмов (ЦММ) является реализация информационно-метрологического сопровождения функционирования технических объектов, обеспеченного методами и средствами получения измерительной информации и ее обработки в заданных целях (для оценки текущего технического состояния (ТТС) машин и механизмов, аварийной защиты, задач исследования, управления и др.) [1, 2].

Анализ методов диагностики различных технических объектов (приборы точной механики, турбоагрегаты ТЭЦ, гидроагрегаты, газотурбинные двигатели, газо- и нефтеперекачивающее оборудование, двигатели внутреннего сгорания, ходовые части железнодорожного транспорта, металлорежущие станки, электродвигатели, подшипники, редукторы и др.) показал, что для получения измерительной информации в основном используют амплитудные методы, например, вибродиагностику. Совершенствование существующих методов проводят, как правило, за счет методов обработки измерительной информации.

Следует отметить большое разнообразие методов и отсутствие единого подхода к получению информации о функционировании ЦММ, в том числе для технической диагностики. В настоящее время для обработки измерительной информации и принятия решений применяют различные подходы: экспертные оценки; методы системного анализа и синтеза; байесовскую методологию; теории распознавания образов, нейронных сетей, технических систем, вероятности, надежности, оптимизации и принятия решений; методы искусственного интеллекта; вейвлет-преобразования; методы теории массового обслуживания; нечеткие множества, методы теории игр; нечеткую логику и др.

При решении задачи получения информации о работе механизма возникают различные вопросы. Какую физическую величину измерять? С какой точностью ее измерять для получения необходимой информации? Какими свойствами должен обладать результат обработки измерительной информации для его использования в целях оценки деградации, выявления особенностей работы механизма, зарождающихся дефектов, оценки ТТС, сравнения вариантов конструкции и т. д.? Для ответа на перечисленные вопросы необходимо разработать эффективные методики достижения гарантированного результата.

**Проблемы получения информации о функционировании ЦММ.** Для получения информации о работе механических и электромеханических машин и механизмов и их ТТС в процессе эксплуатации необходимо обеспечить:

- возможность сравнения измерительной информации и результатов ее обработки на различных отрезках функционирования. Характеристики (диагностические признаки), получаемые на базе результатов измерений и их обработки, должны повторяться качественно (или медленно изменяться) для узнаваемости и различаться количественно, отражая происходящие изменения в течение всего периода эксплуатации [3];

- метрологический уровень средств измерений, позволяющий количественно оценить деградацию и изменения в механизме, отражающихся в контролируемых характеристиках. Необходимо обеспечить метрологический уровень выше уровня стабильности работы механизма для получения информации и оценки медленно протекающих процессов, связанных с

деградацией функционирующего механизма и зарождением дефектов [4];

- взаимосвязь между измеряемыми физическими величинами, результатами измерений и их обработки с конструктивными элементами и процессами, происходящими в механизме. Данную взаимосвязь реализуют с помощью математических моделей и расчетных методик;

- прослеживаемость и привязку средств измерений и измерительной информации к эталонной базе.

Традиционные методы не в полной мере соответствуют перечисленным условиям и, как следствие, остаются нерешенными задачи оценки ТТС, перехода к системе ремонтов оборудования по ТТС, прогноза безаварийной работы, оценки остаточного ресурса и аварийной защиты [1, 3].

Анализ традиционных методов получения информации о функционировании ЦММ, включая вибродиагностику, позволил выявить следующие основные причины отсутствия эффективного информационно-метрологического сопровождения эксплуатации машин и механизмов [1–3, 5, 6].

1. Амплитудные методы получения информации (например, вибродиагностика) не в полной мере обеспечивают решение задач оценки ТТС, гарантированной аварийной защиты и перехода от системы планово-предупредительной системы ремонтов к системе ремонтов по ТТС.

2. Метрологический уровень применяемых для диагностики ЦММ средств измерений — средний или низкий. Относительные погрешности измерений в практике метрологического обеспечения — единицы процентов. В связи с этим не обеспечена необходимая информативность измерительной информации. Основным подходом в диагностике функционирующих ЦММ является мониторинг характеристик виброакустических процессов. Оценка вибро-состояния крупногабаритных машин, определение источников вибрации и максимальное ее устранение остается важной, но нерешенной задачей. Низкий метрологический уровень результатов измерения параметров вибрации (относительная погрешность 1...10 %) не позволяет получить информативные индивидуальные количественные характеристики, необходимые для оценки ТТС, определения зарождающихся дефектов и прогноза. Поэтому остается проблемой получение устойчивых диагностических признаков (или медленно изме-

няющихся) для оценки функционирования механических и электромеханических систем на всех этапах жизненного цикла.

Измерение вибрации для механизмов с распределенной массой позволяет получить в основном статистические характеристики. Реализовано автоматическое определение отдельных дефектов. Применяемые системы мониторинга выполняют измерение текущих значений параметров и предусматривают автоматическое реагирование при достижении пороговых значений.

*Вследствие перечисленных факторов в настоящее время преобладают экспертные оценки, которые носят субъективный характер и зависят от профессионального уровня специалиста, не обеспечивая принятия надежных оперативных решений для выполнения управляющих воздействий и аварийной защиты.*

3. Не обеспечена эффективная диагностика малооборотных и тихоходных механизмов с низким уровнем вибрации, высокооборотных систем и устройств с распределенной массой и др. Традиционные методы и средства непригодны для диагностики приборов точной механики (например, часовые механизмы). Системы сбора информации, регистрирующие виброакустические процессы, принципиально не модернизировались. Совершенствуются в основном методы обработки информации.

4. *Фундаментальной проблемой традиционных методов является определение взаимосвязи между результатами измерений, полученными характеристиками и особенностями функционирования элементов конструкции. Использование физических величин (например, виброскорость и виброускорение) не позволяет установить надежную взаимосвязь между результатами измерений и конструкцией, получить количественную оценку деградации элементов устройства. В связи с этим актуальной проблемой остается создание автоматизированных и автоматических систем диагностики и аварийной защиты ЦММ.*

Обязательным в процессе разработки методов и средств оценки ТТС машин и механизмов является этап классификации дефектов, основанный, как правило, на анализе отказов и техногенных аварий. Выявление дефектов и определение диагностических признаков осуществляют на базе полученных результатов.

Например, в тепло- и гидроэнергетике этот способ применяют более 50 лет. В практике диагностики в меньшей степени используют математическое моделирование работы механизмов с применением вычислительного эксперимента для имитации дефектов и наработки соответствующих диагностических признаков.

5. При анализе работы ЦММ широко используют спектры колебательных процессов, дающих основную диагностическую информацию, но имеющих слабую помехозащищенность. *Основная проблема наиболее распространенных амплитудных методов заключается в том, что виброакустический сигнал содержит всю информацию о взаимодействии деталей работающего механизма, в том числе его естественный вибрационный фон. Но вопросы о том, как извлечь информацию о состоянии определенного узла, как локализовать возникшую неисправность и получить количественные характеристики изменений, остаются нерешенными. Высокий уровень помех и сравнительно малые изменения полезного сигнала определяют сложность выявления дефектов. Структура спектров со временем изменяется (особенно на длительных интервалах эксплуатации) вследствие радикального изменения параметров вибрации, поэтому их использование для оценки эволюции устройства, его ТТС, получения трендов и прогноза является проблематичным [3].* Как правило, существенное повышение общего уровня сигнала или его отдельных компонентов свидетельствует лишь о грубых изменениях состояния диагностируемого механизма, приводящих к потере его работоспособности. Локализация же развивающейся неисправности требует определения взаимосвязи виброакустического сигнала с кинематикой и динамикой элементов конструкции ЦММ. Получены также положительные результаты для сосредоточенных систем (например, выделенная подшипниковая опора).

Основной проблемой являются механические и электромеханические системы (например, турбо- и гидроагрегаты, газотурбинные двигатели и др.) с распределенной массой, так как поиск источника вибрации и получение информации о конкретном элементе с использованием вибродиагностики (например, подшипники ГТД) представляют большую сложность.

Таким образом, традиционные методы и средства не позволяют получить полную информацию об особенностях функционирования

ЦММ (необходимую для надежной оценки ТТС, аварийной защиты, оценки деградации, задач исследования функционирования технических объектов, управления и др.) и, следовательно, создать эффективные автоматизированные и автоматические контрольно-диагностические системы.

**Фазохронометрический метод — новый подход к решению проблем.** В МГТУ им. Н.Э. Баумана (факультет «Машиностроительные технологии», Научно-образовательный инженеринговый центр «Прецизионное метрологическое обеспечение машиностроения») в составе научного направления «Информационно-метрологическое сопровождение создания и эксплуатации циклических машин и механизмов на основе прецизионного хронометрического анализа фазы рабочего цикла» (научный руководитель — профессор М.И. Киселев) применен принципиально новый подход к решению задачи получения информации об особенностях работы и ТТС класса ЦММ — фазохронометрический метод [1, 2]. Задачи получения информации решают в сочетании с традиционными подходами.

Впервые фазохронометрический метод применен к приборам точной механики (программные часовые механизмы) [7–9], затем к турбоагрегату [10–14], двигателям внутреннего сгорания [15], газотурбинным двигателям [16], металлорежущему оборудованию [17–19], редукторам [18, 20], подшипникам и др. [21–23].

В качестве фундаментальной научной основы подхода к получению информации о работе ЦММ предложено использовать фазовые методы на базе средств современной хронометрии, обладающие наивысшей стабильностью и позволяющие регистрировать недоступную традиционным контрольно-диагностическим средствам девиацию характерных параметров машин и механизмов, режимов их работы и деградации.

**Основные особенности фазохронометрического метода.** Наиболее устойчивым процессом любой циклической механической и электромеханической системы является ее рабочий цикл. Технический объект создают для выполнения рабочего цикла, определяющего его функциональное назначение. На этапе эксплуатации задачей всех систем управления и технического обслуживания (все виды профилактики и ремонта) является поддержание характеристик рабоче-

го цикла в заданных пределах, что объективно обуславливает его относительную стабильность. Это предопределяет наличие характеристик, которые должно иметь устройство на этапах испытаний, изготовления и эксплуатации, а их количественное изменение характеризует состояние конкретного серийного экземпляра. Неоднородность рабочего цикла, вызываемая нестабильностью рабочего процесса, погрешностями изготовления и сборки деталей, локальными дефектами и износом, перекосами, люфтами и др., определяет индивидуальность количественных изменений характеристик в процессе деградации циклического механизма [24].

Возможности применяемых в настоящее время методов исследования и оценки ТТС объекта зависят от физических эффектов (виброакустических, тепловых, электродинамических и др.), проявляющихся в процессе работы, а рабочий цикл контролируют на соответствие установленным параметрам (парамет-

рическая диагностика) [3]. При фазохронометрическом подходе регистрируют характеристики движения деталей и частей устройства, а в качестве основного информационного параметра используют интервалы времени (измеряемая физическая величина) движения элементов механизма между границами фаз рабочего цикла. Относительная стабильность и повторяемость кинематических параметров движения элементов механизма при выполнении рабочего цикла гарантирует выявление устойчивых во времени характеристик (диагностических признаков), необходимых для анализа и оценки медленно протекающих изменений (процессов). При этом метрологический уровень хронометрии (прецизионное измерение интервалов времени) позволяет получить индивидуальные количественные характеристики каждого серийного изделия.

В качестве примера на рис. 1–3 приведены результаты последовательного измерения пе-

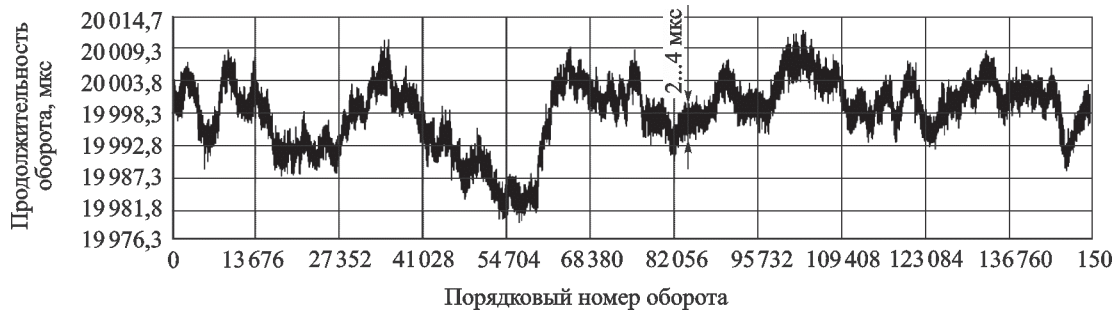


Рис. 1. Периодограмма вращения валопровода турбоагрегата Т-250

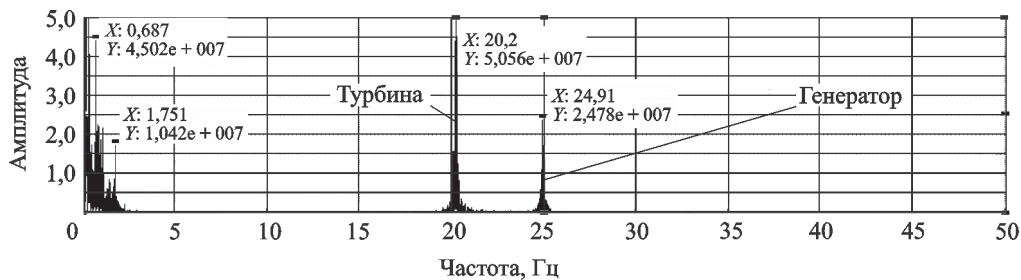


Рис. 2. Спектр крутильных колебаний валопровода турбоагрегата Т-250

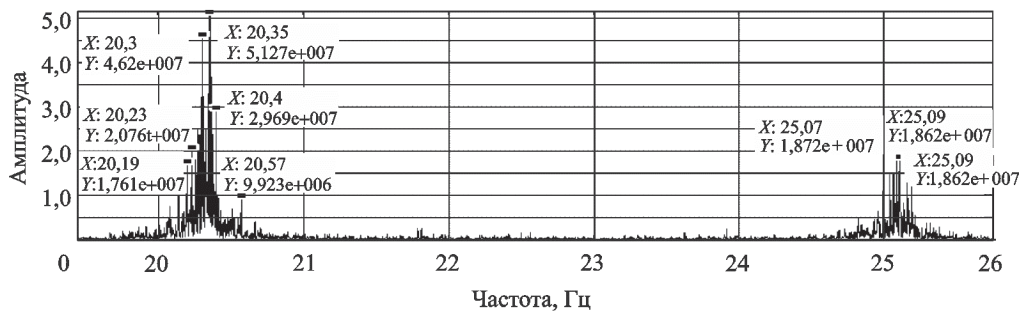


Рис. 3. Детализация спектра крутильных колебаний валопровода турбины и генератора

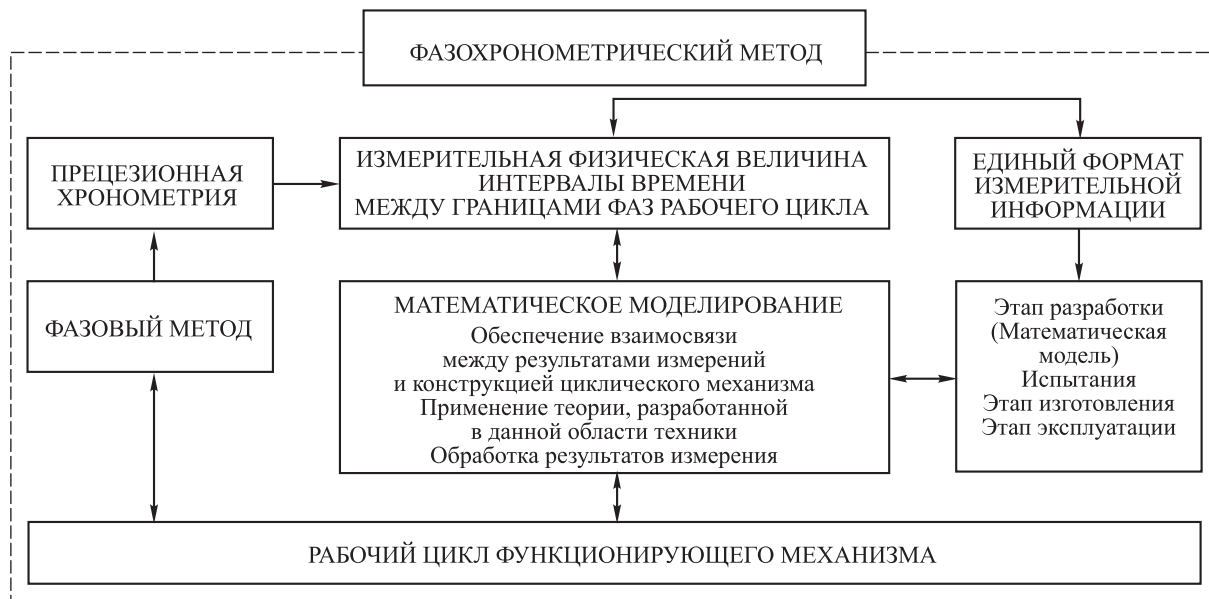


Рис. 4. Функциональная схема фазохронометрического метода

риода вращения и его долей валопроводов турбоагрегатов ТЭЦ Т-250, а также результаты математической обработки (спектр крутильных колебаний). Спектры обладают постоянством и меняются количественно в процессе эксплуатации. Данные получены с применением фазохронометрических систем, которые обеспечили абсолютную погрешность измерения интервалов времени не более  $\pm 1 \cdot 10^{-7}$  с, что соответствует для турбоагрегата относительной погрешности  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$  % от номинального периода на промышленной частоте [10–13].

*Неотъемлемой частью фазохронометрического метода в получении информации о работе механизма (например, для исследования или оценки ТТС) является математическое моделирование на базе теории, разработанной специалистами в данной области техники. Эта задача традиционными методами не решена. Результатом вычислительного эксперимента являются ряды интервалов времени, соответствующие получаемым фазохронометрическими системами экспериментальным данным, что значительно ускоряет идентификацию математической модели.*

Математическое моделирование циклического механизма при фазохронометрическом подходе включает в себя [15, 16, 18, 25]:

- анализ работы устройства, установление взаимосвязи результатов измерений (рядов интервалов времени) и их обработки с конструкцией изделия, особенностями функцио-

нирования элементов устройства и режимами их работы;

- моделирование дефектов и получение аналога экспериментальных данных (рядов интервалов времени) для выявления диагностических признаков и разработки классификации дефектов, а также для анализа не реализуемых экспериментально аварийных режимов работы объекта и др.

На рис. 4 приведена функциональная схема фазохронометрического метода.

Фазохронометрический метод имеет единый формат измерительной информации (интервалы времени) и следовательно, методически единые подходы в обработке результатов измерений, что позволяет создать информационную базу экспериментальных данных для всех этапов жизненного цикла изделия. Тем самым этапы методически связываются в единое целое, а накопленную информацию при появлении новых методов обработки можно неоднократно анализировать в целях повышения надежности и совершенствования конструкции.

## Выводы

1. Фазохронометрический метод позволяет на качественно новом уровне получить информацию о функционировании машин и механизмов на базе выявления устойчивых характеристик (или медленно количественно изменяющихся) и индивидуальных количественных характеристик, сопровождающих

эксплуатацию изделий одного типа и обеспечивающих сравнительную оценку их работы, деградации и прогноз.

2. Создан единый комплекс технических средств фазохронометрии и математического моделирования, обеспечивающий получение информации о функционировании циклического механизма на всех этапах жизненного цикла и реализующий взаимосвязь между результатами измерений и их обработки с элементами конструкции при решении конкретных задач (исследование механических и электромеханических систем, техническая диагностика, аварийная защита и др.).

3. Технические средства современной прецизионной хронометрии, обладающие наивысшей точностью, позволяют регистрировать не-

доступную традиционным диагностическим средствам деградацию функционирующего изделия, девиацию его параметров и выявлять зарождающиеся дефекты.

4. Составной частью фазохронометрического метода является математическое моделирование на базе теории технического объекта, обеспечивающее взаимосвязь между результатами измерений и их математической обработки с конструкцией изделия.

5. Обеспечен информационный обмен между этапами жизненного цикла, а также сквозное использование математических, физических и других моделей, сохранение и передача баз данных с этапа эксплуатации в аналитические центры, конструкторские бюро и на заводы для совершенствования конструкции изделий.

## Литература

- [1] Киселев М.И., Комшин А.С., Байков А.И., Пронякин В.И., Руденко А.Л. Многофакторное информационно-метрологическое сопровождение эксплуатации гидроагрегатов на базе фазохронометрического метода. *Гидротехническое строительство*, 2015, № 2, с. 2–8.
- [2] Киселев М.И., Пронякин В.И. Проблема точности при метрологическом обеспечении производства и эксплуатации машин и механизмов. *Проблемы машиноведения: точность, трение и износ, надежность, перспективные технологии: Сб. ст.*, Санкт-Петербург, Наука, 2005, с. 7–24.
- [3] Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов. *Измерительная техника*, 2008, № 10, с. 9–13.
- [4] Киселев М.И. Зачем нужна такая точность? *Метрология*, 2013, № 7, с. 4–7.
- [5] Генкин М.Д., Соколова А.Г. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов*. Москва, Машиностроение, 1987. 288 с.
- [6] Киселев М.И., Пронякин В.И. Перспективы электроэнергетики России. *Приборы*, 2014, № 2, с. 25–33.
- [7] Киселев М.И., Пронякин В.И. Прецизионная автоматическая бесконтактная диагностика и разработка САПР устройств точной механики. *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Исследования динамики и прочности машин*, 1986, № 467, с. 59–68.
- [8] Киселев М.И., Пронякин В.И. Измерительно-вычислительное обеспечение создания часовых механизмов. *Измерительная техника*, 2003, № 5, с. 22–28.
- [9] Бростюк В.В., Киселев М.И., Пронякин В.И. Оптоэлектронные средства автоматической диагностики приборов точной механики. *Приборы и системы управления*, 1990, № 4, с. 21–23.
- [10] Киселев М.И., Новик Н.В., Пронякин В.И. Регистрация параметров крутильных колебаний валопровода турбогенератора. *Измерительная техника*, 2000, № 12, с. 34–36.
- [11] Зройчиков Н.А., Киселев М.И., Козлов А.П., Пронякин В.И. Измерительный контроль синхронного генератора большой мощности в рабочем режиме на основе хронометрического подхода. *Новое в Российской электроэнергетике*. 2000, № 3, с. 17–21. URL: <http://energo-press.info/> (дата обращения 21 января 2015).
- [12] Киселев М.И., Зройчиков Н.А., Пронякин В.И., Чивилев Я.В. Прецизионное исследование работы турбоагрегата оптико-электронными средствами. *Теплоэнергетика*, 2006, № 11, с. 10–13.
- [13] Киселев М.И., Пронякин В.И. Быстропротекающие переходные режимы функционирования валопровода мощного турбоагрегата. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, № 5. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/192225.html> (дата обращения 15.01. 2016).

- [14] Бережко И.А., Гостюхин О.С., Комшин А.С. Информационные измерительные фазохронометрические системы для диагностики в области электроэнергетики. *Приборы*, 2014, № 5, с. 13–17.
- [15] Киселев М.И., Комшин А.С. Особенности динамики дизель-генераторных установок тепловозов. *Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского*, 2012, № 5 (2), с. 107–112.
- [16] Киселев М.И., Комшин А.С., Пронякин В.И., Корсун О.Н., Немичев М.В. Многофакторные математические модели функционирования авиационных газотурбинных двигателей в фазохронометрическом представлении. *Метрология*, 2011. № 9, с. 13–27.
- [17] Комшин А.С., Сырицкий А.Б. Измерительно-вычислительные технологии эксплуатации металлорежущего оборудования и инструмента. *Мир измерений*, 2014, № 12, с. 3–9.
- [18] Потапов К.Г. Оценка технического состояния главных приводов токарных станков фазохронометрическим методом. *Мир измерений*, 2014, № 12, с. 10–18.
- [19] Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков. *Приборы*, № 5, 2014, с. 18–22.
- [20] Кудрявцев Е.А., Атаманов В.Н., Пронякин В.И., Гуляев В.Н. Измерительный контроль износа рабочих поверхностей зубчатых колес в процессе эксплуатации. *Приборы*, 2014, № 6, с. 52–55.
- [21] Комшин А.С. Математическое моделирование процесса измерительного контроля деградации конструкционных материалов. *Метрология*, 2010, № 8, с. 17–22.
- [22] Комшин А.С. Имитационное математическое моделирование экспериментального определения параметров деградирующей колебательной системы. *Измерительная техника*, 2008, № 10, с. 5–8.
- [23] Комшин А.С., Медведева О.В. Измерительный контроль деградации свойств конструкционных материалов валопроводов. *Измерительная техника*, 2014, № 5, с. 34–38.
- [24] Пронякин В.И. Информационно-метрологическое сопровождение жизненного цикла машин и механизмов на базе прецизионного хронометрического анализа фазы рабочего цикла. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 32 с.
- [25] Комшин А.С. Математическое моделирование измерительно-вычислительного контроля электромеханических параметров турбоагрегатов фазохронометрическим методом. *Измерительная техника*, 2013, № 8, с. 12–15.

## References

- [1] Kiselev M.I., Komshin A.S., Baikov A.I., Proniakin V.I., Rudenko A.L. Multifactor information and metrological support of operation of hydropower units based on the method phase chronometric. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering]. 2015, no. 2, pp. 2–8.
- [2] Kiselev M.I., Proniakin V.I. Problema tochnosti pri metrologicheskom obespechenii proizvodstva i ekspluatatsii mashin i mekhanizmov [The problem of accuracy in the metrological support of production and operation of machines and mechanisms]. *Problemy mashinovedeniia: tochnost', trenie i iznos, nadezhnost', perspektivnye tekhnologii: sb. st.* [Problems of Mechanical Engineering: accuracy, friction and wear, reliability, advanced technology: a collection of articles]. Sankt-Peterburg, Nauka publ., 2005, pp. 7–24.
- [3] Pronyakin V.I. Problems in diagnosing cyclic machines and mechanisms *Measurement Techniques*, 2008, vol. 51, no. 10, pp. 1058–1064.
- [4] Kiselev M.I. Zachem nuzhna takaia tochnost'? [Why do we need such accuracy?] *Metrologiia* [Measurement Techniques]. 2013, no. 7, pp. 4–7.
- [5] Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroakusticheskaia diagnostika mashin i mekhanizmov* [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 288 p.
- [6] Kiselev M.I., Proniakin V.I. Perspektivy elektroenergetiki Rossii [Perspectives of power industry of Russia]. *Pribory* [Instruments]. 2014, no. 2, pp. 25–33.
- [7] Kiselev M.I., Proniakin V.I. Pretsizionnaia avtomaticheskai beskontaktnaia diagnostika i razrabotka SAPR ustroystv tochnoi mekhaniki [Precision non-contact automatic diagnosis and development of SAPR devices of precision mechanics]



- and the development of CAD precision mechanics devices]. *Tr. MVTU im. N.E. Baumana. Issledovaniia dinamiki i prochnosti mashin* [Proceedings of the BMSTU. Studies of the dynamics and strength of machines]. 1986, no. 467, pp. 59–68.
- [8] Kiselev M.I., Proniakin V.I. Izmeritel'no-vychislitel'noe obespechenie sozdaniia chasovykh mekhanizmov [Measuring and computing to ensure the creation of movements]. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measurement Techniques]. 2003, no. 5, pp. 22–28.
- [9] Brostiuk V.V., Kiselev M.I., Proniakin V.I. Optoelektronnye sredstva avtomaticheskoi diagnostiki priborov tochnoi mekhaniki [Optoelectronic means automatic diagnostic devices precision mechanics]. *Pribory i sistemy upravleniia* [Instruments and Control Systems]. 1990, no. 4, pp. 21–23.
- [10] Kiselev M.I., Novik N.V., Proniakin V.I. Registratsiia parametrov krutil'nykh kolebaniy valoprovoda turbogeneratora [Registration of parameters of torsional vibrations of the shafting of a turbo generator]. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measurement Techniques]. 2000, no. 12, pp. 34–36.
- [11] Zroichikov N.A., Kiselev M.I., Kozlov A.P., Proniakin V.I. Izmeritel'nyi kontrol' sinkhronnogo generatora bol'shoi moshchnosti v rabochem rezhime na osnove khronometricheskogo podkhoda [Measuring control synchronous generator more power in operating mode based on the chronometric approach]. *Novoe v Rossiiskoi elektroenergetike* [New in the Russian electric power industry]. 2000, no. 3, pp. 17–21. URL: <http://energo-press.info/> (accessed 21 January 2015).
- [12] Kiselev M.I., Zroichikov N.A., Proniakin V.I., Chivilev Ia.V. Pretsizionnoe issledovanie raboty turboagregata optiko-elektronnyimi sredstvami [Precise research work turbounit opto-electronic means]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 2006, no. 11, pp. 10–13.
- [13] Kiselev M.I., Proniakin V.I. Bystroprotekaiushchie perekhodnye rezhimy funktsionirovaniia valoprovoda moshchnogo turboagregata [Quickly proceeding transitive modes of functioning turbine drive shaft of the powerful turbine unit]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2011, no. 5. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/192225.html> (accessed 15 January 2016).
- [14] Berezhko I.A., Gostiukhin O.S., Komshin A.S. Informatsionnye izmeritel'nye fazokhronometricheskie sistemy dlia diagnostiki v oblasti elektroenergetiki [Information measuring phase-chronometric systems for diagnostics in the field of power industry]. *Pribory* [Instruments]. 2014, no. 5, pp. 13–17.
- [15] Kiselev M.I., Komshin A.S. Osobennosti dinamiki dizel'-generatornykh ustanovok teplovozov [Specific Features of Diesel Generator Set Dynamics]. *Vestnik NNGU im. N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod]. 2012, no. 5 (2), pp. 107–112.
- [16] Kiselev M.I., Komshin A.S., Pronyakin V.I., Korsun O.N., Nemichev M.Yu. Mechanical measurements: Multifactorial mathematical models of the functioning of gas-turbine aviation engines in a phase-chronometric representation. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, no. 9, pp. 1081–1090.
- [17] Komshin A.S., Syritskii A.B. Izmeritel'no-vychislitel'nye tekhnologii ekspluatatsii metallo-rezhushchego oborudovaniia i instrumenta [Measuring and computing technology operating metal-cutting equipment and tools]. *Mir izmerenii* [Measurement World]. 2014, no. 12, pp. 3–9.
- [18] Potapov K.G. Otsenka tekhnicheskogo sostoiianiia glavnykh privodov tokarnykh stankov fazokhronometricheskim metodom [Evaluation of the technical condition of the main drives lathes fazokhronometricheskim method]. *Mir izmerenii* [Measurement World]. 2014, no. 12, pp. 10–18.
- [19] Potapov K.G., Syritskii A.B. Realizatsiia izmeritel'noi fazokhronometricheskoi sistemy dlia diagnostiki tekhnicheskogo sostoiianiia tokarnykh stankov [The implementation phase of the measuring time keeping system for diagnosing the technical condition of lathes]. *Pribory* [Instruments]. 2014, no. 5, pp. 18–22.
- [20] Kudriavtsev E.A., Atamanov V.N., Proniakin V.I., Guliaev V.N. Izmeritel'nyi kontrol' iznosa rabochikh poverkhnostei zubchatykh koles v protsesse ekspluatatsii [Measuring wear of working surfaces of the control gear during operation]. *Pribory* [Instruments]. 2014, no. 6, pp. 52–55.

- [21] Komshin A.S. Matematicheskoe modelirovanie protsessa izmeritel'nogo kontrolya degradatsii konstruktsionnykh materialov [Mathematical modeling of process measurement control degradation of structural materials]. *Metrologiia* [Measurement Techniques]. 2010, no. 8, pp. 17–22.
- [22] Komshin A.S. Simulation modeling of the experimental parameter determination for a deteriorating vibrational system. *Measurement Techniques*, 2008, vol. 51, no. 10, pp. 1053–1057.
- [23] Komshin A.S., Medvedeva O.V. Measurement Control of the Degradation of the Properties of the Structural Materials of Shaft Lines. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 5, pp. 526–532.
- [24] Proniakin V.I. Informatsionno-metrologicheskoe soprovozhdenie zhiznennogo tsikla mashin i mekhanizmov na baze pretsizionnogo khronometricheskogo analiza fazy rabocheho tsikla. Diss. dokt. tekhn. nauk [Information and metrological support lifecycle machines and mechanisms on the basis of precise chronometric analysis cycle phase. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 32 p.
- [25] Komshin A.S. Mathematical modelling of measurement-computational monitoring of the electromechanical parameters of turbine units by a phase-chronometric method. *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 8, pp. 850–855.

Статья поступила в редакцию 08.02.2016

## Информация об авторе

**ПРОНЯКИН Владимир Ильич** (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Метрология и взаимозаменяемость». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vip-u@yandex.ru).

## Information about the author

**PRONYAKIN Vladimir Ilyich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department Metrology and Interchangeability. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vip-u@yandex.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет 3-е издание учебника  
**Н.М. Иванова, Л.Н. Лысенко**

### «Баллистика и навигация космических аппаратов»

Изложены теоретические основы и методы решения практически значимых прикладных задач баллистики и навигации космических аппаратов. Показано, что баллистико-навигационное обеспечение полета и баллистические характеристики космических аппаратов в значительной степени определяются целевым назначением, зависят от действующих технических ограничений, а также физических условий космического пространства и (или) атмосфер планет, в которых происходит движение космических аппаратов.

Рассмотрены основные тенденции развития и разработка алгоритмов решения задач баллистико-навигационного обеспечения оперативного управления полетом.

Описаны последние достижения в области теории и практики решения задач космической баллистики. Содержание учебника соответствует курсу лекций, читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Ракетостроение и космонавтика».

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru