



В.И. Пронякин

**Машины, механизмы и метрология  
XXI века**

***Рекомендуемая форма библиографической ссылки***

Пронякин В.И. Машины, механизмы и метрология XXI века // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды 2-й Международной конференции (7-8 февраля 2019 г., Москва). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2019. — С. 91-98. — URL: <https://keldysh.ru/future/2019/9.pdf> doi:[10.20948/future-2019-9](https://doi.org/10.20948/future-2019-9)

## Машины, механизмы и метрология XXI века

В.И. Пронякин

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана*

**Аннотация.** В статье рассмотрены проблемы получения информации о работе машин и механизмов традиционными амплитудными методами, например вибродиагностикой. Рассматриваются вопросы получения информации о функционировании циклических механизмов в оценке деградации, текущего технического состояния, выявления зарождающихся дефектов. Проанализированы причины, не позволяющие достигнуть необходимых результатов, и возможности создания автоматизированных и автоматических систем диагностики циклических механизмов. Представлен принципиально новый фазохронометрический метод, основанный на возможностях прецизионной хронометрии и фазового подхода к анализу работы машин и механизмов. Описаны методологические основы фазохронометрического метода. Представлены результаты математического моделирования и экспериментальных работ получения информации о функционировании циклических механизмов с помощью этого метода.

**Ключевые слова:** циклические механизмы, техническая диагностика, измерительная информация, фазохронометрия, прецизионная хронометрия, фазовый метод, интервалы времени

## Machines, mechanisms and metrology of the XXI century

V.I. Proniakin

*Bauman Moscow State Technical University*

**Abstract.** The article deals with the problems of obtaining information on the operation of machines and mechanisms by traditional amplitude methods, for example, vibration diagnostics. The problems of obtaining information about the functioning of cyclical mechanisms in assessing the assessment of degradation, the current technical state of detecting emerging defects are considered. The reasons for not allowing to achieve the required results and the possibility of creating automated and automatic systems for diagnosing cyclic mechanisms are analyzed. A fundamentally new phase-chronometric method based on the possibilities of precision chronometry and a phase approach to the analysis of the operation of machines and mechanisms is presented. The

methodological foundations of the Phaso chronometric method are described. The results of mathematical modeling and experimental work of obtaining information on the functioning of cyclic mechanisms by the phase-chronometric method are presented.

**Keywords:** cyclical mechanisms, technical diagnostics, measurement information, phase chronometry, precision chronometry, phase method, time intervals

## **1. Состояние вопроса**

В настоящее время для реализации цифровой экономики важной задачей является получение достоверной первичной информации о состоянии оборудования и эксплуатируемых технических объектов.

Для надёжной, оптимальной и экономически обоснованной эксплуатации машин и механизмов необходимо обеспечить:

- мониторинг текущего технического состояния изделия с целью его диагностики и прогноза безаварийной работы;
- ремонт изделий и оборудования в соответствии с текущим техническим состоянием вместо системы планово-предупредительных ремонтов;
- оценку остаточного ресурса;
- надёжную аварийную защиту.

Вся практика создания и эксплуатации механических и электромеханических систем подтверждает, что данные задачи не решены традиционными подходами к получению информации о работе машин и механизмов. Это связано с недостаточным метрологическим уровнем и низкой информационной эффективностью традиционных подходов к оценке работы функционирующих технических систем.

Для обработки информации и принятия решений в настоящее время предлагаются и применяются различные методы: теория нейронных сетей, теория распознавания образов, спектральный анализ, методы системного анализа и синтеза, теория технических систем, теория надёжности и старения машин и механизмов, вейвлет–преобразования, элементы теории детерминированного хаоса, методы теории массового обслуживания, методы теории игр, методы искусственного интеллекта, методы теории идентификации, методы нейроинформатики, методы цифровой обработки и анализа сигналов и изображений, теории оптимизации, теории принятия решений, байесовская методология, теория надёжности, нечеткие множества, нечеткая логика, системный анализ, вероятностно-лингвистическое моделирование и др. Основными для принятия решений являются экспертные оценки. Следует отметить отсутствие единого подхода к решению задач получения информации о функционировании класса циклических машин и механизмов.

## **2. Проблемы традиционных подходов в получении информации о работе циклических механизмов**

На традиционных принципах не удалось создать эффективные встроенные информационные диагностические системы. К основным причинам отсутствия эффективного информационно-метрологического сопровождения эксплуатации машин и механизмов относятся различные факторы.

Метрологический уровень средств измерений, применяемых для диагностики машин и механизмов, в настоящее время средний или низкий. Относительные погрешности измерений составляют единицы процентов, поэтому не обеспечивается необходимая информативность измерительной информации для оценки текущего технического состояния, остаточного ресурса, прогноза и гарантированной аварийной защиты.

Применяемые системы сбора информации о вибрации узлов изделия принципиально не совершенствовались. Развиваются в основном системы обработки информации (более детальный анализ спектра вибрации, экспертные системы, основанные на методах нечеткой логики, нейронных сетей и др.). При этом обеспечение минимального уровня вибросостояния объекта принципиально важно и является сложной проблемой.

Основным подходом в диагностике функционирующих машин и механизмов является мониторинг характеристик виброакустических процессов. Достигнутый метрологический уровень параметров первичных преобразователей при относительной погрешности от 0,1 до 10% не обеспечивает получение информации для выявления зарождающихся дефектов, принятия эффективных решений о текущем техническом состоянии в автоматизированном режиме и надёжной аварийной защиты.

Фундаментальной проблемой использования виброакустических процессов является определение взаимосвязи между измеренными параметрами вибрации и диагностируемыми элементами конструкции. Так как в основе вибродиагностики лежит теория колебаний, крайне сложной является задача математического описания функционирующего устройства.

Применяемые системы мониторинга выполняют измерение текущих значений параметров и предусматривают автоматическое реагирование при достижении пороговых значений. Остаётся проблемой выявление устойчивых диагностических признаков для оценки функционирования машин и механизмов и выявления зарождающихся дефектов, поэтому в основном используются экспертные оценки. Однако экспертная оценка специалиста не обеспечивает принятие абсолютно надёжных оперативных решений для выполнения управляющих воздействий и аварийной защиты.

Низкий метрологический уровень результатов измерения параметров вибрации не позволяет получить информативные индивидуальные количественные характеристики циклического механизма, необходимые

для оценки его текущего технического состояния и определения зарождающихся дефектов. Реализовано автоматическое определение отдельных дефектов. Отсутствует прослеживаемость и привязка диагностических систем и измерительной информации к эталонной базе (в предлагаемом подходе диагностические средства привязаны к Единой системе времени и частоты). Также отсутствуют методы получения информации, позволяющей оценить медленно протекающие процессы, связанные с деградацией функционирующего механизма и появлением дефектов (в настоящее время регистрируются в основном грубые дефекты, предаварийное и аварийное состояния).

В настоящее время широко применяются амплитудные методы, среди которых ведущее положение занимает вибродиагностика. Её основой являются колебательные процессы, возникающие при взаимодействии частей устройства. Однако в связи с приработкой, износом, изменением режимов работы, условий эксплуатации и деградацией технической системы происходит неизбежное изменение параметров колебательных процессов, исключающее сохранение устойчивых во времени диагностических признаков. Поэтому устанавливаются предельные значения параметров вибрации. Это, как правило, уровни и пороги, отражающие статистические, а не индивидуальные характеристики работы устройств. Для сложных технических объектов системы виброакустической диагностики адаптируются для каждого серийного объекта. Проблема использования спектров колебательных процессов, дающих основную диагностическую информацию, состоит в том, что они также необратимо изменяются в течение эксплуатации, исключая возможность их сравнения на длительных временных интервалах.

В соответствии со сложившимся положением в настоящее время отсутствуют автоматизированные и автоматические системы диагностики, а применяются системы мониторинга параметров технических объектов, и поэтому основными являются экспертные оценки. Результат обеспечивается опытом экспертов, технического персонала и специалистов ремонтных организаций, а также знанием особенностей конкретного и аналогичного оборудования. Экспертная оценка специалиста не обеспечивает принятие надежных оперативных решений для выполнения управляющих воздействий и аварийной защиты в реальном времени.

Таким образом, без разработки новых подходов на базе достижений фундаментальных наук и новых методов получения информации в процессе функционирования машин и механизмов невозможна эффективная оценка технического состояния машин и механизмов.

### **3. Фазохронометрический метод диагностики циклических машин и механизмов**

В МГТУ им. Н.Э.Баумана развивается научное направление: «Информационно-метрологическое сопровождение создания и эксплуатации циклических машин и механизмов на основе прецизионного хронометрического анализа фазы рабочего цикла» [1-6]. Это принципиально новый подход к решению круга проблем мониторинга циклических машин и механизмов (часовые механизмы, турбоагрегаты, газотурбинные двигатели, двигатели внутреннего сгорания, редукторы и т.д.). Впервые фазохронометрический метод был применен к приборам точной механики (программные часовые механизмы), так как традиционные методы для них неработоспособны.

Наиболее устойчивым в машинах и механизмах является рабочий цикл, и все мероприятия по техническому обслуживанию направлены на поддержание его параметров. В традиционных методах диагностики используются физические эффекты, возникающие при работе изделия. Так, при оценке динамики работы механической системы основным источником информации является взаимодействие деталей в процессе функционирования объекта.

В основу фазохронометрического метода положен *принцип измерения интервалов времени между характерными границами фаз рабочего цикла*. Вариации интервалов времени между фазами рабочего цикла формируются механическими и электромеханическими связями в механизме, а время как параметр входит в математическое описание объектов и процессов. Это дает возможность с использованием математического моделирования связать результаты измерений и их обработки с конструктивными элементами объекта.

### **4. Основные преимущества фазохронометрического метода получения информации о работе машин и механизмов**

Выполненные в условиях эксплуатации прецизионные фазохронометрические измерения для турбоагрегатов ТЭЦ, приборов точной механики, редукторов и др. в сочетании с математическим моделированием обеспечили получение принципиально новой информации о работе машин и механизмов. Математическая обработка экспериментальных данных (временных рядов) выявила устойчивые диагностические признаки и индивидуальные количественные характеристики каждого типа исследуемых устройств, что является основой для решения поставленных задач. С помощью фазохронометрического подхода появилась возможность сравнения работы устройства на различных стадиях эксплуатации, индивидуальной оценки текущего технического состояния и деградиационных эффектов.

Прецизионная точность измерения интервалов времени в сочетании с математическим моделированием позволяет определять девиации параметров объекта для оценки функционирования, диагностики и аварийной защиты. В качестве фундаментальной научной основы фазохронометрического метода к определению текущего технического состояния машин и механизмов предлагаются средства современной хронометрии, обладающие наивысшей стабильностью. Благодаря наивысшей стабильности, а следовательно, и точности средств измерения времени и частоты, возможна регистрация девиации характерных параметров конструкции, режимов ее работы и деградации, недоступная традиционным контрольно-диагностическим средствам. Также реализовано применение математического моделирования на базе традиционной теории данного технического объекта, что не обеспечивают традиционные подходы, и учет фактора времени, ответственного за деградацию машин и механизмов на всех этапах ее жизненного цикла.

Математические модели в фазохронометрическом представлении обеспечивают анализ функционирования машин и механизмов с учетом девиации параметров конструктивных материалов и получение информации в целях диагностики объекта на базе единого комплекса технических средств фазохронометрического контроля и математического моделирования.

Примером представлены хронограммы вращения шпинделя металлорежущего станка в системе «привод–редуктор–подшипники–шпиндель», полученные математическим моделированием и измерением на станке. Отличия минимальны, а следовательно, математическим моделированием до серийного выпуска изделия можно моделировать дефекты, определить их отражение в измерительной информации и разрабатывать классификацию дефектов [7].

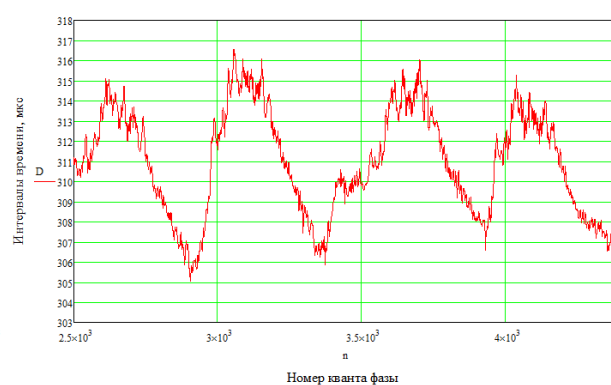
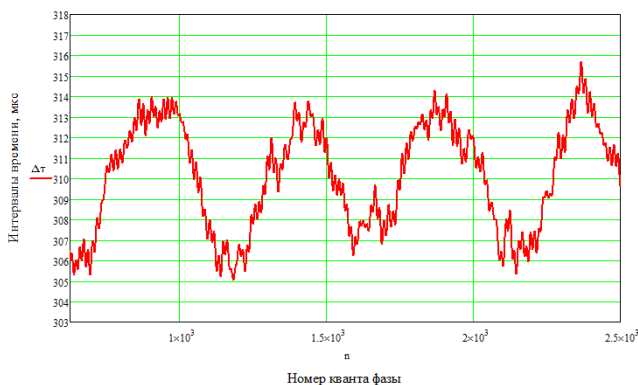


Рис. 1. Теоретическая хронограмма    Рис. 2. Экспериментальная хронограмма

На базе фазохронометрического подхода получены устойчивые характеристики (или медленно количественно изменяющиеся),

### *3. Технологические перспективы цифровой реальности*

сопровождаящие эксплуатацию технических объектов одного типа, необходимые для оценки текущего технического состояния, деградации и прогноза. Также обеспечено получение индивидуальных количественных характеристик – для количественной оценки изменения технического состояния объекта на этапе эксплуатации.

Использование на всех этапах единой физической величины (интервалы времени) позволяет реализовать информационный обмен между этапами жизненного цикла, сквозное использование математических, физических и других моделей изделия, передачи и сохранения технических данных на протяжении жизненного цикла машин и механизмов, например, генерирующего оборудования, ходовых частей транспорта и др.

Для турбоагрегатов ТЭЦ впервые реализованы высокоточные измерения параметров крутильных колебаний ротора генератора и всего валопровода ТА (1995 г.). Зарегистрированы внезапные быстропротекающие процессы в штатном режиме работы турбоагрегатов, вызванные изменением нагрузки во внешней сети и не регистрируемые штатными средствами, но адекватные по воздействию на валопровод неправильной синхронизации в момент включения генератора под нагрузку и при его отключении от внешней сети. Эти операции значительно сокращают остаточный ресурс валопровода и способствуют образованию трещин. Подтверждены возможность измерения угла скручивания валопроводов и определение момента, развиваемого на валу в рабочем режиме (в том числе и для гидроагрегатов), надёжного измерительного контроля девиации конструктивных параметров объектов в результате деградации и износа конструктивного материала при длительной эксплуатации. Также разработаны системы диагностики для измерения износа зубчатых передач в условиях эксплуатации, подшипников и др.

Таким образом, основные результаты для машин и механизмов получены благодаря достижениям прецизионной хронометрии в сочетании с фазовым методом, что меняет существующее представление о функционировании машин и механизмов.

#### **Литература**

1. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Проблема точности при метрологическом обеспечении производства и эксплуатации машин и механизмов // Проблемы машиноведения: точность, трение и износ, надёжность, перспективные технологии / Под ред. В.П. Булатова. – СПб: Наука, 2005. С.7-24.
2. Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов // Измерительная техника. 2008. №10. С. 9-13.
3. Пронякин В.И. К вопросу оценки результатов измерений и их обработки в целях получения информации о функционировании машин



- и механизмов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016, №5. С. 74-83.
4. Пронякин В.И. Диагностические признаки в оценке технического состояния машин и механизмов // Автоматизация в промышленности. 2016. №10. С. 64-70.
  5. Байков А.И., Киселёв М.И., Комшин А.С., Пронякин В.И., Руденко А.Л. Многофакторное информационно-метрологическое сопровождение эксплуатации гидроагрегатов на базе фазохронометрического метода // Гидротехническое строительство. №2. 2015. С. 2-8.
  6. Кудрявцев Е.А., Атаманов В.Н., Пронякин В.И., Гуляев В.Н. Измерительный контроль износа рабочих поверхностей зубчатых колёс в процессе эксплуатации // Приборы. 2014, №6. С. 52-55.
  7. Потапов К.Г. Оценка технического состояния главных приводов токарных станков фазохронометрическим методом // Мир измерений, 2014, №12. С. 10-18.