

УДК 53.083.721+004.932.2+681.78

## **Метод фазовой модуляции в системах контроля параметров роторных машин**

проф., д.т.н. Сычев В. В.<sup>1,\*</sup>,

[\\*viktorsychev@list.ru](mailto:viktorsychev@list.ru)

Сырицкий А. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В данной статье рассматриваются вопросы расширения функциональных возможностей систем контроля и диагностики технического состояния машин и механизмов за счет использования метода фазовой модуляции и принципа псевдообращения оптического пучка. Представлено описание технических решений по реализации подавления несущей частоты спектра сигнала первичного преобразователя диагностической системы. Применение подобной технологии позволяет повысить соотношение «сигнал/шум», а также реализовать более высокую точность диагностического контроля. Описанный метод следует рассматривать как способ получения дополнительной информации к уже существующим методам диагностики, таким, например, как фазохронометрический метод. Ключевые слова: контроль технического состояния, метод фазовой модуляции, принцип псевдообращения.

**Ключевые слова:** контроль технического состояния, метод фазовой модуляции, принцип псевдообращения

---

### **1. Введение**

В настоящее время основное оборудование предприятий добывающей и обрабатывающей отраслей, энергетические установки России изрядно изношены, морально устарели и практически исчерпали ресурс работы. Вследствие этого все чаще происходят сбои в работе предприятий, крупные технические аварии и техногенные катастрофы [1]. Необходимое и немедленное обновление материально-технической базы реального сектора экономики страны ввиду затратности и инерционности процессов инновации в условиях финансово-экономического кризиса не представляется возможным. Например, для крупномасштабной модернизации и массового ввода в эксплуатацию электрических станций и теплоэлектростанций (ТЭС) нового поколения, промышленного освоения нетрадиционных источников энергии потребуются не годы, а десятилетия. А потому проблема повышения надежности существующего оборудования, по нашему мнению, должна решаться

путем своевременной диагностики существующего оборудования, выявления критических ситуаций и поэтапной замены наиболее отработанных агрегатов и оборудования. Здесь и далее в статье будут рассматриваться вопросы диагностики на примере гидроагрегатов ТЭЦ. Такой выбор обусловлен тем, что гидроагрегат является ярким примером роторной технической системы, выход из строя которой несет угрозу жизни и здоровью людей, кроме того может привести к колоссальным экономическим потерям.

## **2. Основные проблемы диагностики машин и механизмов**

В настоящее время для контроля и диагностики машин и механизмов преимущественно используются различные амплитудные и амплитудно-частотные характеристики, позволяющие по вариациям уровня и спектрального состава шумов и вибраций механизма определять изменения его технического состояния [2,3,4]. Данные подходы характеризуются ограничениями, связанными с естественным виброакустическим фоном механизма. В дополнение к ним используются также фазово-частотный и частотно-хронометрический методы.

В таких условиях каждая роторная машина требует постоянного мониторинга, индивидуальной оценки его текущего технического состояния и аварийной защиты [5,6]. Установленные на промышленных объектах системы управления и контрольно-диагностическое оборудование, как показывает практика, не обеспечивают решения этих задач.

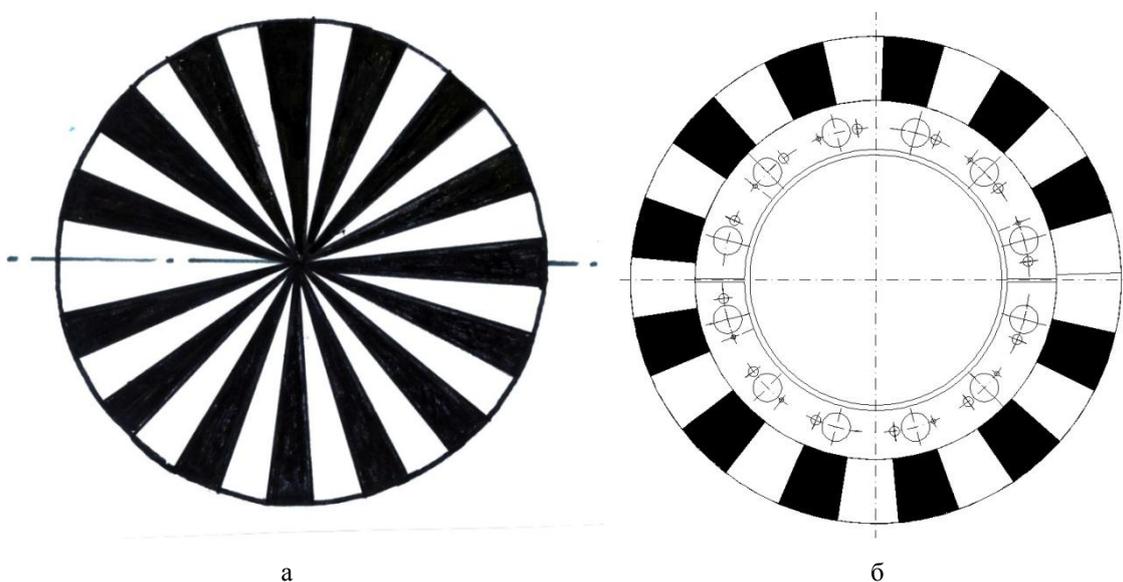
Сейчас в теплоэнергетике в рамках мероприятий по аварийной защите широко применяются методы вибродиагностики, однако с ее помощью контролируется только наступление предельных состояний конструкции турбоагрегата и его элементов в процессе эксплуатации. Особенность метода вибродиагностики состоит в том, что виброакустический сигнал включает в себя всю информацию о взаимодействии деталей работающего механизма. Основная проблема при этом заключается в том, как выделить из этого суммарного сигнала информацию о состоянии конкретного узла и указать место возникшей неисправности. Большой уровень помех и сравнительно малые изменения полезного сигнала затрудняют выявление дефектов. Обычно существенное повышение общего уровня сигнала или его отдельных компонентов свидетельствует об уже наступивших грубых изменениях состояния диагностируемого механизма, приводящих к потере его работоспособности. Оперативное выявление развивающейся неисправности, еще не приведшей к катастрофическим последствиям, определение степени развития зарождающегося дефекта и прогноз его поведения крайне сложны. Основным недостатком вибродиагностики является то, что

она не дает дифференцированной информации о состоянии конкретных узлов, типе неисправности и месте ее возникновения [7].

### 3. Фазовый принцип выделения информации о нестабильности вращающегося ротора

Определенный интерес с точки зрения диагностики динамических режимов роторов энергетических установок может представлять взаимосвязь спектра частот модулированного сигнала с параметрами вращающегося ротора. Это позволит сделать надёжный прогноз технического состояния функционирующего объекта с целью раннего предупреждения об аварии и получить необходимую систематическую информацию о параметрах объекта.

Наиболее подходящим для этого видом модулятора может служить вращающийся растр, показанный на рисунке (рис.1), в котором путем подавления несущей частоты колебания, реализуется фазовый принцип кодирования полезной информации. Модулирующий растр, представляющий собой чередующиеся прозрачные и непрозрачные сектора, выполнен таким образом, что в спектре частот несущая частота колебания отсутствует (подавлена), а вся полезная информация находится в боковых частотах.



**Рис. 1.** Модулирующий растр фазового принципа кодирования полезной информации  
а – принципиальная схема модулирующего растра, б – пример технической реализации измерительного диска для установки на ротор диагностируемого агрегата на основе модулирующего растра

При этом в качестве полезной информации следует понимать наличие проявления неустойчивости режимов, скачкообразного изменения параметров, а также пространственные координаты источников неустойчивости.

Полный период колебания происходит за два полных оборота модулятора, каждый раз претерпевая скачок по фазе на  $180^\circ$  относительно исходного колебания на границе каждого оборота. Это приводит к подавлению несущей частоты колебания, т.е. к резкому повышению соотношения сигнал/шум. Это можно видеть из следующих рассуждений.

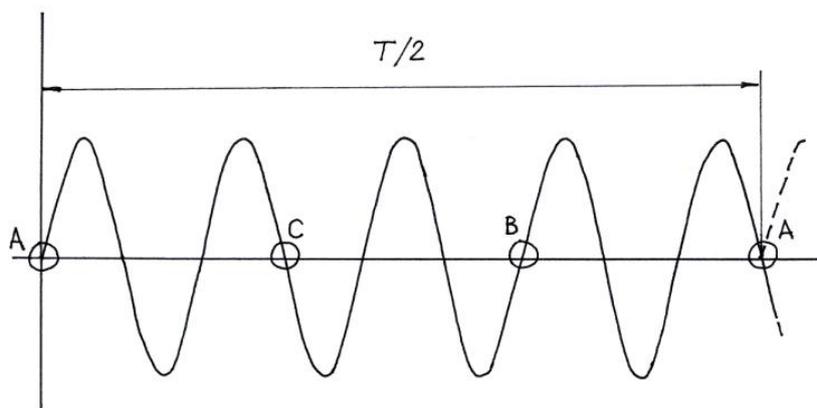


Рис. 2. К расчету спектра колебаний

Если принять, что в системе отсутствуют источники неустойчивости (идеальный случай), функцию колебаний можно представить в виде:

$$f(t) = \frac{A}{2(1 + \sin \omega_0 t)}; \quad (1)$$

где  $A$  – амплитуда колебания,

$\omega_0 = \Omega(2n - 1)$  – круговая частота;

$\Omega = \frac{2\pi}{2T} = \frac{\pi}{T}$  – частота цуга полувольт;

$$\omega_0 = 2\pi \frac{n - \frac{1}{2}}{T} = \pi \frac{2n - 1}{T};$$

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{2}{T} \int_0^T \frac{A}{2} (1 + \sin \omega_0 t) \cos \omega_k t dt = \frac{A}{T} \int_0^T \cos \omega_k t dt + \frac{A}{T} \int_0^T \sin \omega_0 t \cos \omega_k t dt = \\ &= A \frac{\sin \omega_k t}{T \omega_k} \Big|_0^T - A \frac{\cos(\omega_0 - \omega_k) t}{2T(\omega_0 - \omega_k)} \Big|_0^T - A \frac{\cos(\omega_0 + \omega_k) t}{2T(\omega_0 + \omega_k)} \Big|_0^T = \end{aligned}$$

$$= A \frac{\sin T\omega_k}{T\omega_k} - A \frac{\cos T(\omega_0 - \omega_k)}{2T(\omega_0 - \omega_k)} + \frac{A}{2T(\omega_0 - \omega_k)} - A \frac{\cos T(\omega_0 + \omega_k)}{2T(\omega_0 + \omega_k)} + \frac{A}{2T(\omega_0 + \omega_k)};$$

$$\omega_k = \omega_0 \pm k\Omega = \omega_0 \pm \frac{k\omega_0}{2n-1} = \omega_0 \left(1 \pm \frac{k}{2n-1}\right) =$$

$$= \Omega \frac{(2n-1)(2n \pm k - 1)}{2n-1} = \frac{\pi}{T} (2n \pm k - 1) \text{ - } k\text{-тая гармоника круговой частоты};$$

$$T\omega_k = \pi(2n \pm k - 1); T\omega_0 = \pi(2n - 1);$$

$$A_k = A \frac{\sin \pi(2n \pm k - 1)}{\pi(2n \pm k - 1)} -$$

$$- A \frac{\cos \pi(2n - 1 - 2n \mp k + 1)}{2\pi(\mp k)} + A \frac{1}{2\pi(\mp k)} - A \frac{\cos \pi(4n \pm k - 2)}{2\pi(4n \pm k - 2)} + A_k = \mp A \frac{\cos \pi k}{2\pi k} \mp A \frac{1}{2\pi k};$$

$$+ A \frac{1}{2\pi(4n \pm k - 2)};$$

В итоге получаем (Рис.4.):

$A_0 = 0$ ; Резонансная частота отсутствует!

$A_1 = A \frac{1}{\pi}$ , Боковая частота колебаний.

$A_2 = 0$ , Вторая гармоника также отсутствует!

$A_3 = A \frac{1}{3\pi}$ , Третья гармоника.

И так далее.

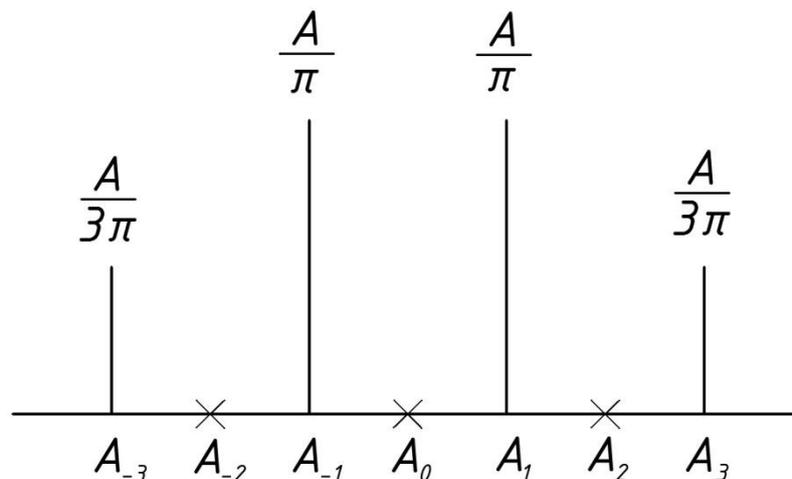


Рис. 3. Спектр частот колебаний при отсутствии источников неустойчивости

В случае появления источников нестабильности, спектр частот колебаний изменится, будет нарушен принцип подавления несущей за счет отличия скачка по фазе на границе каждого оборота модулятора от  $180^\circ$ . Появится несущая частота и целый ряд других частот, амплитуда которых будет свидетельствовать не только о наличии нестабильности, но и о степени отступления этой нестабильности от номинального режима.

#### 4. Схемы реализации метода фазовой модуляции

Из практики разработки опико-электронных датчиковых устройств известны методы фазового кодирования информации о поведении исследуемого объекта посредством растровой модуляции отраженного от объекта излучения [8], позволяющие преодолеть недостатки виброакустической диагностики.

На рис.4. представлена функциональная схема измерительной системы, реализующая метод фазовой модуляции.

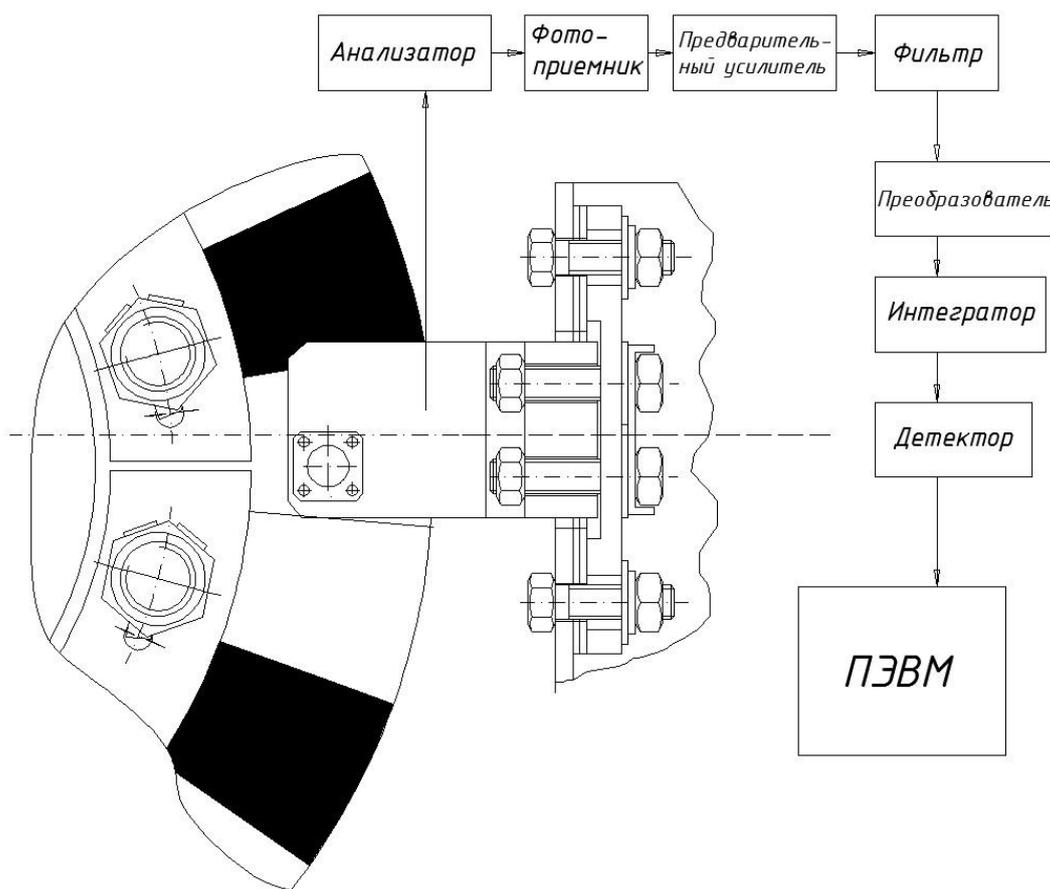


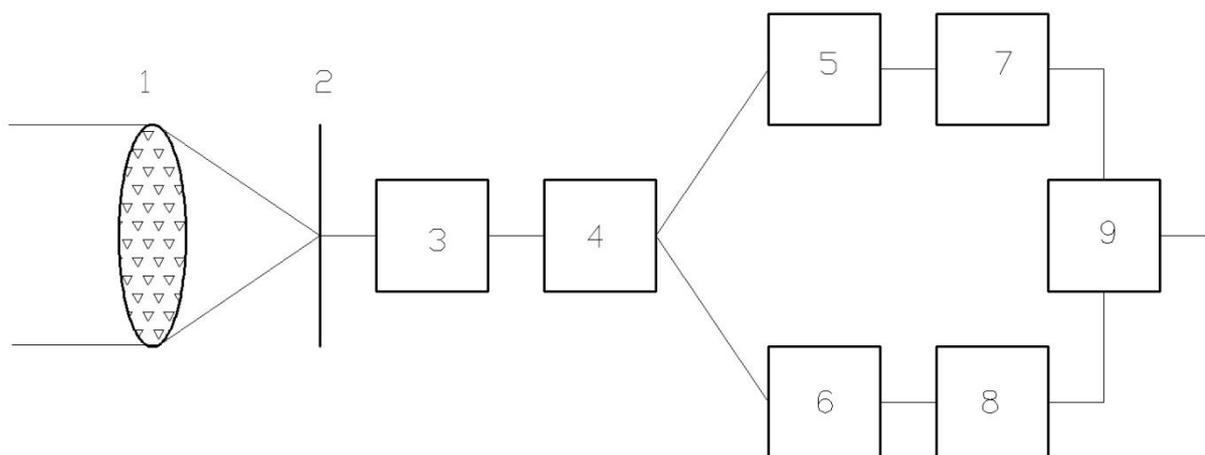
Рис. 4. Функциональная схема измерительной системы

Измерительный диск, установленный на муфте валов генератора и возбuditеля, вращаясь, модулирует световой поток, который поступает в блок формирования измерительного сигнала, вырабатывающий в свою очередь измерительный импульс. Измерительный сигнал по оптическим линиям связи передается в блок обработки информации, где выполняется кодирование и запись информации в виде массивов данных на жесткий диск или в оперативную память.

Обработка результатов измерений выполняется с применением пакета прикладных программ.

Рассмотрим один из примеров использования вышеописанного раstra и его возможности с точки зрения повышения помехозащищенности оптико-электронных устройств с анализаторами изображений за счет компенсации шумовых составляющих электрического сигнала на выходе системы обработки.

На рис. 5 приведена одна из возможных структурных схем обработки сигнала в оптико-электронном устройстве.



**Рис. 5.** Структурная схема обработки сигнала в измерительной системе:

1 – оптическая система; 2 – анализатор изображения (модулятор); 3 – приемник лучистой энергии; 4 – широкополосный усилитель; 5,6 – избирательные усилители; 7,8 – амплитудные детекторы; 9 – сумматор.

Поток лучистой энергии от источника попадает на вход оптической системы 1, которая фокусирует это излучение в плоскость анализатора изображения 2. Модулированный анализатором изображения поток с помощью ПЛЭ 3 преобразуется в соответствующие колебания электрического тока, описываемые выражением (2):

$$f(t) = \begin{cases} -\frac{A}{2} \cos \omega_1 t & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{T_\Omega}{2} \\ \frac{A}{2} \cos \omega_2 t & \text{при } \frac{T_\Omega}{2} \leq t \leq T_\Omega \end{cases} \quad (2)$$

где  $A$  – амплитуда колебания электрического сигнала,

$\omega_1, \omega_2$  - круговая частота модулированного сигнала для соответствующих частот чередования прозрачных и непрозрачных секторов модулятора,

$T_\Omega$  - период одного оборота модулятора.

Эти колебания усиливаются широкополосным усилителем 4 до величины, удобной для дальнейшей обработки электрического сигнала. Нетрудно показать, что амплитудный спектр модулированного сигнала характеризуется следующим коэффициентом при косинусах гармонических составляющих [9]:

$$a_k = -\frac{A}{2\pi k_1} \sin \frac{\pi}{2} k_1 + \frac{A}{4\pi k_2} \sin \frac{3\pi}{2} k_2 - \frac{A}{4\pi k_2} \sin \frac{\pi}{2} k_2. \quad (3)$$

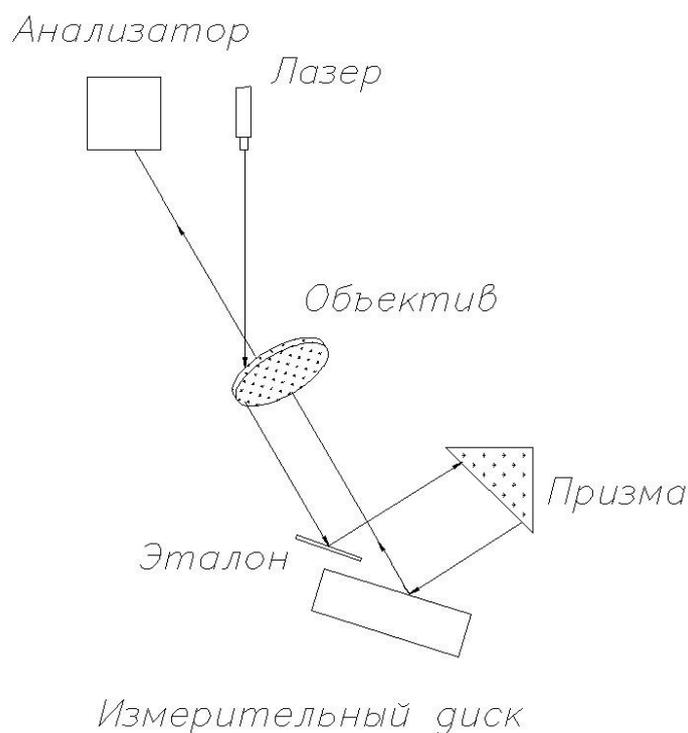
Избирательные усилители 5 и 6 включены параллельно друг другу и служат для выделения из общего спектра модулированного сигнала участков, соответствующих каждый своему значению несущей частоты  $\omega_i$ .

Детекторы 7 и 8 соответственно каждый для своего канала выделяют огибающую электрического сигнала на выходах избирательных усилителей. Выходные напряжения детекторов по полярности их постоянных составляющих включены навстречу друг другу и образуют сумматор 9, с выхода которого снимается результирующий сигнал частоты  $\Omega$  (частота вращения модулятора). В силу того, что обе половины модулирующего диска с разной плотностью чередующихся прозрачных и непрозрачных секторов расположены диаметрально противоположно, огибающие на выходах детекторов оказываются сдвинутыми по фазе в одном канале относительно другого на  $\pi$ . В сумматоре за счет встречного включения выходов детекторов обоих каналов происходит увеличение (удвоение) амплитуды огибающей и вычитание помеховых сигналов, не претерпевающих фазового сдвига.

## 5. Принцип псевдообращения в системе динамического контроля

С целью подавления вредного влияния различных факторов в системе динамического контроля схема измерения реализует принцип псевдообращения [9] (Рис.6.), при котором выходящий и возвращенный пучки практически идут по одному и тому же пути с небольшим пространственным смещением, обеспечивая этим сначала отражение от опорной

поверхности выходящего пучка, а затем – от измеряемой поверхности объекта возвращенного пучка. Поэтому схема становится нечувствительной к любым другим погрешностям системы, кроме взаимного положения пары «эталон-объект».



**Рис. 6.** Схема измерения

Основным достоинством такой схемы при ее работе в реальном времени является нерасстраиваемость, которая обеспечивается размещением источника излучения (лазер) и анализатора в эквивалентной плоскости и применением световозвращателей (трипель-призма) для переноса пучков контрольного излучения на поверхность объекта. Формирующая система (объектив) обеспечивает формирование волнового фронта контрольного излучения. Результат анализа поступает в регистрирующее устройство.

В современной технике стабильно актуальными являются вопросы диагностики. В первую очередь, несомненно, за счет прямой связи между качественной, стабильной и безаварийной работой оборудования и безопасностью людей. Также играет роль экономический фактор: аварии, незапланированные простои оборудования и его внеплановый ремонт ведут к финансовым потерям эксплуатирующих организаций.

## 6. Заключение

Применение вышеизложенного метода в совокупности с существующими методами ди-

агностики роторных машин и механизмов, таких, например, как фазохронометрический метод, может расширить возможности этих методов за счет получения дополнительной информации о работе контролируемого агрегата. А значит и поможет решить задачу диагностики более качественно. Информационный канал измерительной системы в этом случае может быть дополнен предлагаемым модулирующим растром. В таком случае возможно упрощение задачи обработки измерительной информации, содержащейся в боковых частотах модулированного сигнала при использовании метода фазовой модуляции. При этом, за счет получения возможности выявления признаков нестабильности характеристик однотипных машин и механизмов, возможно повысить точность проводимых измерений. Применение вышеописанного метода также целесообразно для контроля технического состояния вспомогательных машин крупных технических систем. Там где важнейшими характеристиками систем мониторинга являются, прежде всего, дешевизна, надежность, а также простота конструкции и легкость в эксплуатации. Данный метод является универсальным и подходит как для применения в системах контроля упомянутых выше турбоагрегатов, так и для меньших по массогабаритным характеристикам машин, таких как металлообрабатывающие станки, насосы, двигатели внутреннего сгорания и другие.

### Список литературы

1. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // Измерительная техника. 2001. № 9. С. 15-18.
2. Ильющенков С.Ф., Рождественский Д.Б. Вибродиагностика роторных машин // Научно-технические технологии. 2007. № 10. С. 76-82.
3. Козочкин М. П., Маслов А.Р., Порватов А.Н. Инновационный аппаратно-программный комплекс для диагностирования высокотехнологичных систем // Инновации. 2013. № 10. С. 128-131.
4. Николаев М.Ю., Николаева Е.В., Березовский В.С., Никитин Е.В. Контроль метрологических параметров и вибродиагностика электрических комплексов для определения состояния оборудования теплоэлектростанции // Энергобезопасность и энергосбережение. 2013. № 4. С. 22-25.
5. Бережко И.А., Гостюхин О.С., Комшин А.С. Информационно измерительные фазохронометрические системы для диагностики в области электроэнергетики // Приборы. 2014. № 5. С. 13-17.
6. Киселёв М.И., Зройчиков Н.А., Пронякин В.И., Чивилев Я.В. Прецизионное исследование работы турбоагрегата оптико-электронными средствами // Теплоэнергетика. 2006. № 11. С. 10-13.

7. Комшин А.С., Сырицкий А.Б. Измерительно-вычислительные технологии эксплуатации металлорежущего оборудования и инструмента // Мир измерений. 2014. № 12. С. 3-9.
8. Макаров В.А., Сычев В.В. Авторское свидетельство № 27887 СССР. 1964.
9. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2005. 464 с.

## Phase Modulation Method for Control Systems of Rotary Machine Parameters

V.V. Sychev<sup>1,\*</sup>, A.B. Syritskiy<sup>1</sup>

[\\*viktorsychev@list.ru](mailto:viktorsychev@list.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** lightened optical elements (segments), adaptive compensation, segmented primary mirror of the telescope

---

Traditionally, vibration-based diagnostics takes the main place in a large complex of technical control means of rotary machine operation. It allows us to control the onset of extreme limit states of operating construction and its elements. However, vibration-based diagnostics is incapable to provide differentiated information about the condition of particular units, type of fault and point of its occurrence.

From the practical experience of optoelectronic sensors development, methods of phase coding information about the behavior of the investigated object are known. They allow us to overcome the abovementioned disadvantage of vibration-based diagnostics through the modulation of the reflected radiation from the object. This phase modulation is performed with the image analyzers, in which the modulating raster (alternating transparent and nontransparent sectors) is designed so, that the carrier frequency of oscillations is absent (suppressed) in frequency spectrum, and all useful information can be found in the side frequencies.

Carrier frequency suppression appears for two complete turns of the modulating raster. Each time during this process oscillations have a 180° phase shift (hop) relatively to the initial oscillation on the boundary of each turn. It leads to a substantial increase in signal/noise ratio and possibility to conduct high-accuracy diagnostics.

The principle of the pseudo inversion is used for measurements to suppress an adverse effect of various factors in dynamic control system. For this principle the leaving and returned beams practically go on the same way with small spatial shift. This shift occurs then the leaving beam reflects from a basic surface and the reflected – from the measured surface of the object. Therefore the measurements become insensitive to any other errors of system, except relative position of system «model-object».

The main advantages of such measurements are the following:

- system steadiness to error;
- real time signal processing;
- high-accuracy;
- simplicity of implementation and economic feasibility;

- insensitivity to any other errors of system, except relative position of system «model-object».

The offered system will allow making a real time operational evaluation of critical nodes and units directly under operation.

## References

1. Kiselev M.I., Pronyakin V.I. A phase method of investigating cyclic machines and mechanisms based on a chronometric approach. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2001, no. 9, pp. 15-18. (English translation: *Measurement Techniques*, 2001, vol. 44, is. 9, pp. 898-902 DOI: [10.1023/A:1013247419491](https://doi.org/10.1023/A:1013247419491) ).
2. Il'yushenkov S.F., Rozhdestvenskiy D.B. Vibration diagnostics of rotating machines. *Naukoemkie tekhnologii*, 2007, no. 10, pp. 76-82. (in Russian).
3. Kozochkin M. P., Maslov A.R., Porvatov A.N. The Innovative Hardware-Software Complex for Diagnostic of High-Tech Systems. *Innovatsii*, 2013, no. 10, pp. 128-131. (in Russian).
4. Nikolaev M.Yu., Nikolaeva E.V., Berezovskiy V.S., Nikitin E.V. Metrological control and vibration diagnostics of power energy equipment for thermal power stations. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy-safety and energy-economy*, 2013, no. 4, pp. 22-25. (in Russian).
5. Berezko I.A., Gostyukhin O.S., Komshin A.S Information measuring phase-chronometric systems for diagnostics in the field of power industry. *Pribory*, 2014, no. 5, pp. 13-17. (in Russian).
6. Kiselev M.I., Zroychikov N.A., Pronyakin V.I., Chivilev Ya.V. A precision investigation of turbine unit operation using optic-electronic instruments. *Teploenergetika*, 2006, no. 11, pp. 10-13. (English translation: *Thermal Engineering*, 2006, vol. 53, is. 11, pp. 868-872. DOI: [10.1134/S0040601506110036](https://doi.org/10.1134/S0040601506110036) ).
7. Komshin A.S., Syritskiy A.B. Measuring and computing technologies of operation of cutting equipment and tools. *Mir izmereniy*, 2014, no. 12, pp. 3-9. (in Russian).
8. Makarov V.A., Sychev V.V. Inventor's certificate SU no. 27887, 1964.
9. Sychev V.V. *Adaptivnye opticheskie sistemy v krupnogabaritnom teleskopostroenii* [Adaptive optical systems in large-dimensions telescope engineering]. Staryy Oskol, “Tonkie naukoemkie tekhnologii” Publ., 2005. 464 p. (in Russian).