

П. Ю. БРАНЦЕВИЧ, канд. техн. наук, доц.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)

АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ РАЗЛОЖЕНИЯ НА ПЕРИОДИЧЕСКУЮ И ШУМОПОДОБНУЮ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Аннотация

В процессе эксплуатации производственного оборудования необходимы оценка и прогнозирование изменения его технического состояния, своевременное обнаружение возникающих неисправностей и предупреждение аварийных ситуаций, что особенно важно для предприятий критической инфраструктуры. Для решения задач технической диагностики требуется изучение изменений вибрационного состояния технических объектов на разных режимах работы, обнаружение редких кратковременных изменений структуры вибрационного сигнала. Предлагается метод анализа вибрационных сигналов, основанный на его декомпозиции в виде периодической и шумоподобной компонент, определении их параметров и характеристик и выявлении вибрационных всплесков и возмущений.

Ключевые слова: вибрация, сигнал, разложение, составляющая, анализ

Одним из важнейших требований к оборудованию предприятий критической инфраструктуры (энергетика, нефтехимия, газотранспортная система), является обеспечение безаварийной работы. Поэтому в процессе эксплуатации производственного оборудования необходимы оценка и прогнозирование изменения его технического состояния, своевременное предупреждение и обнаружение возникающих неисправностей. Для сложных механизмов и агрегатов с вращательным движением вибрационный контроль, мониторинг, диагностика являются основополагающими в решении этих задач [1].

Для решения задач по улучшению вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния турбоагрегатов Белорусской энергосистемы была предложена концепция построения компьютерных измерительно-вычислительных комплексов (ИВК). Компьютер является основным элементом такого ИВК, а его функциональность определяется программным обеспечением, разрабатываемым под конкретные производственные задачи и достаточно просто модифицируемым при изменении или расширении функциональных требований. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровые используется универсальный модуль АЦП, подключаемый на стандартную шину компьютера и передающий данные в компьютер в режиме реального масштаба времени. На входы АЦП могут подключаться выходы любых первичных информационных каналов, которые преобразуют изменения физических величин в электрический сигнал тока или напряжения [2].

Предложена структура ИВК для работы в режиме реального времени с групповым переключением каналов для многоточечного контроля многоопорного механизма или агрегата. Разработано несколько модификаций ИВК (серия «Лукомль», «Палессе», «Полоцк»). При работе ИВК «Лукомль» для определения параметров вибрационных сигналов в большинстве случаев используется вибрационный сигнал длительностью 200 мс, что соответствует десяти оборотам вала турбоагрегата, вращающегося с частотой 50 Гц. Каждая подшипниковая опора контролируется в трех направлениях: вертикальном, горизонтально-поперечном и горизонтально-осевом. Для каждой точки контроля вычисляется 14 параметров вибрации, а для подшипниковой опоры, соответственно, 42. Для турбоагрегата с восемью подшипниковыми опорами каждые 2 секунды вычисляются 336 параметров. Следовательно, для турбоагрегата за час получается 604 800 значений параметров вибрации, а за сутки – более 14 млн. значений, которые сохраняются в файлах на жестком диске компьютера. Таким образом, уже к концу 90-х годов внедрение ИВК «Лукомль» обеспечило получение больших данных производственного назначения [2, 3].

Мониторинг параметров вибрации позволяет выявлять изменения состояния наблюдаемых механизмов и агрегатов в ходе их эксплуатации при изменении режимов работы и нагрузок. Однако этого недостаточно для решения задач технической диагностики и прогнозирования.

Если стоит задача создания системы проактивного технического обслуживания оборудования, то возникает потребность тщательного изучения изменений вибрационного состояния технических объектов на разных режимах работы в течение их эксплуатации, обнаружения редких кратковременных изменений структуры вибрационного сигнала и выявления причинно-следственных связей между их появлением и развитием дефектов. Для этого осуществляется регистрация и анализ непрерывных вибрационных сигналов, отражающих состояние объекта, на протяжении длительных временных интервалов (часы и даже сутки) [2, 4].

Проводя анализ формы вибрационных сигналов, отражающих интенсивность механических колебаний корпусных элементов механизмов роторного типа, функционирование которых предполагает вращательное движение, и их амплитудных спектров, можно заметить, что в большинстве случаев такие вибрационные сигналы содержат периодическую компоненту, состоящую из гармоник, кратных частоте вращения, и некоторую шумоподобную составляющую.

Поэтому, с целью более детального исследования предлагается представить исходный вибросигнал в виде суммы периодической и шумоподобной составляющих [4, 5]:

$$x(nt_d) = p(nt_d) + s(nt_d) = \sum_{m=1}^L A_m \cos(2\pi k_m f_0 nt_d - \varphi_m) + s(nt_d), \quad (1)$$

где $p(nt_d)$ – периодическая составляющая вибрационного сигнала; $s(nt_d)$ – шумоподобная составляющая вибрационного сигнала; n – номер дискретного

отсчета, $n=0, 1, 2, \dots$; t_d – интервал дискретизации; f_o – частота вращения приводного вала (оборотная частота); k_m – кратность m -й гармоники, включенной в периодическую составляющую, относительно f_o ; A_m, f_m, φ_m – амплитуда, частота, начальная фаза m -й гармоники, $f_m = k_m f_o$; L – число гармоник, выбранных для периодической составляющей вибросигнала.

Кратность гармоник, входящих в состав периодической составляющей вибросигнала, определяется с учетом параметров подшипников, зубчатых передач, схемы редуктора контролируемого узла и его других конструктивных особенностей. Если точно известна частота f_o , то амплитуда и начальная фаза m -й гармоники легко вычисляются с помощью дискретного преобразования Фурье, причем количество дискретных точек преобразования выбирается таким, чтобы интервал анализа был кратным (в рамках возможностей интервала дискретизации) периоду f_m .

Когда частота f_o известна, периодическая составляющая сигнала $p(nt_d)$ вычисляется по формуле первого слагаемого выражения (1), а шумоподобная составляющая находится как:

$$s(nt_d) = x(nt_d) - p(nt_d). \quad (2)$$

После разделения вибрационного сигнала на полигармоническую и шумоподобную составляющие определяются параметры каждой из составляющих в отдельности.

При этом можно сделать предположение, что изменения параметров периодической составляющей – следствие достаточно существенного изменения технического состояния объекта, а локальные изменения шумоподобной составляющей – это проявление зарождающихся дефектов. На рис. 1 и 2 показан исходный вибрационный сигнал, отражающий вибрационное состояние подшипниковой опоры генератора, его периодическая и шумоподобная составляющие, а также их амплитудные спектры.

В качестве вибрационного всплеска или возмущения можно признать превышение шумоподобной составляющей вибрационного сигнала по абсолютной величине некоторого порогового уровня a_p . Уровень a_p определяется для нормального вибрационного состояния контролируемого объекта на временном интервале, соответствующем 4–8 оборотам ротора (вала). Можно предложить следующую формулу для вычисления a_p :

$$a_p = k_e a_{RMS} PF, \quad (3)$$

где k_e – повышающий коэффициент, выбирается большим единицы с учетом однородности шумоподобной составляющей; a_{RMS} – СКЗ шумоподобной составляющей; PF – пик-фактор шумоподобной составляющей.

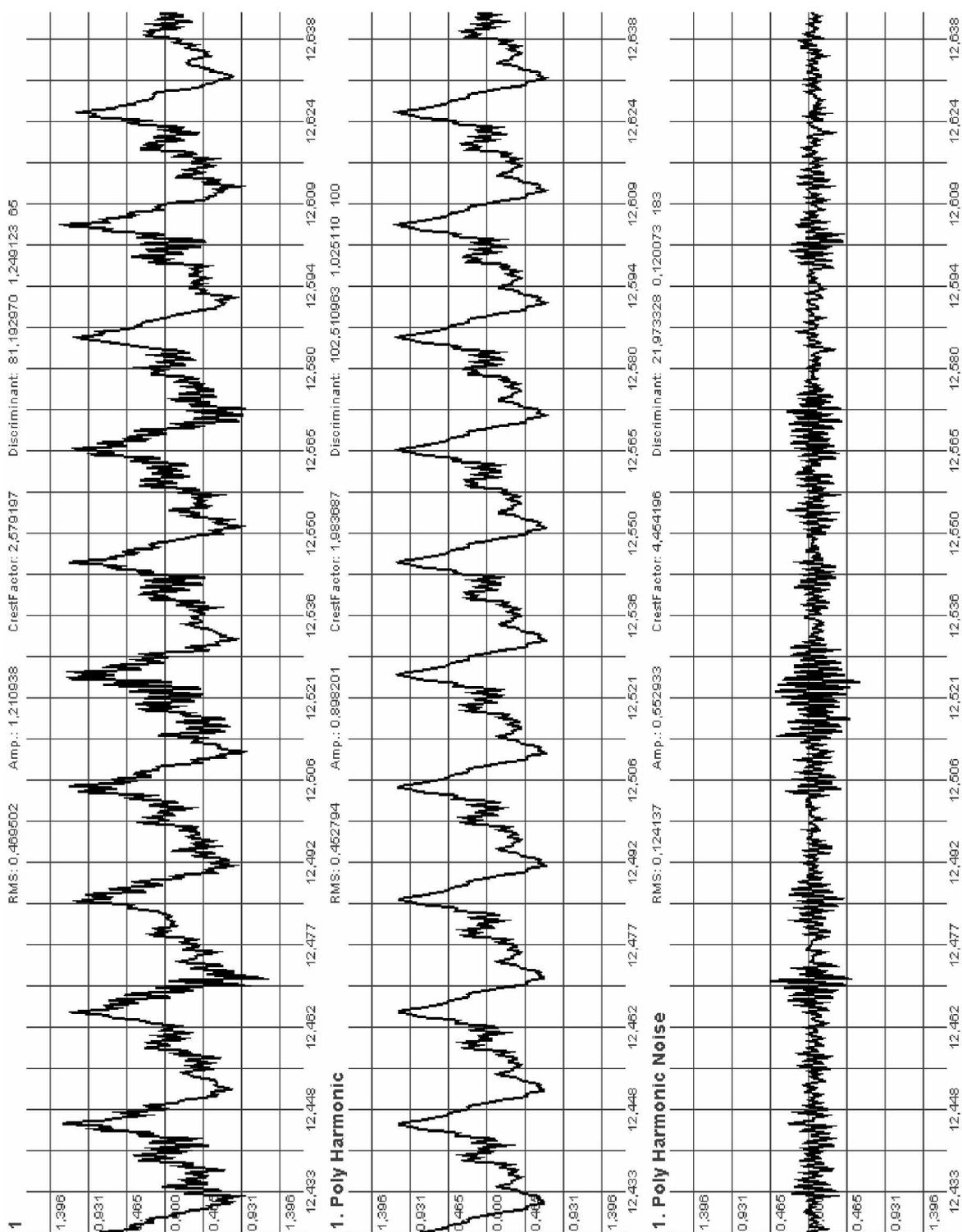


Рис. 1. – Временная реализация вибросигнала в единицах виброускорения, полученная при исследовании подшипниковой опоры генератора мощностью 100 МВт, ее периодическая и шумоподобная составляющие (ось абсцисс – время, с; ось ординат – виброускорение, m/s^2)

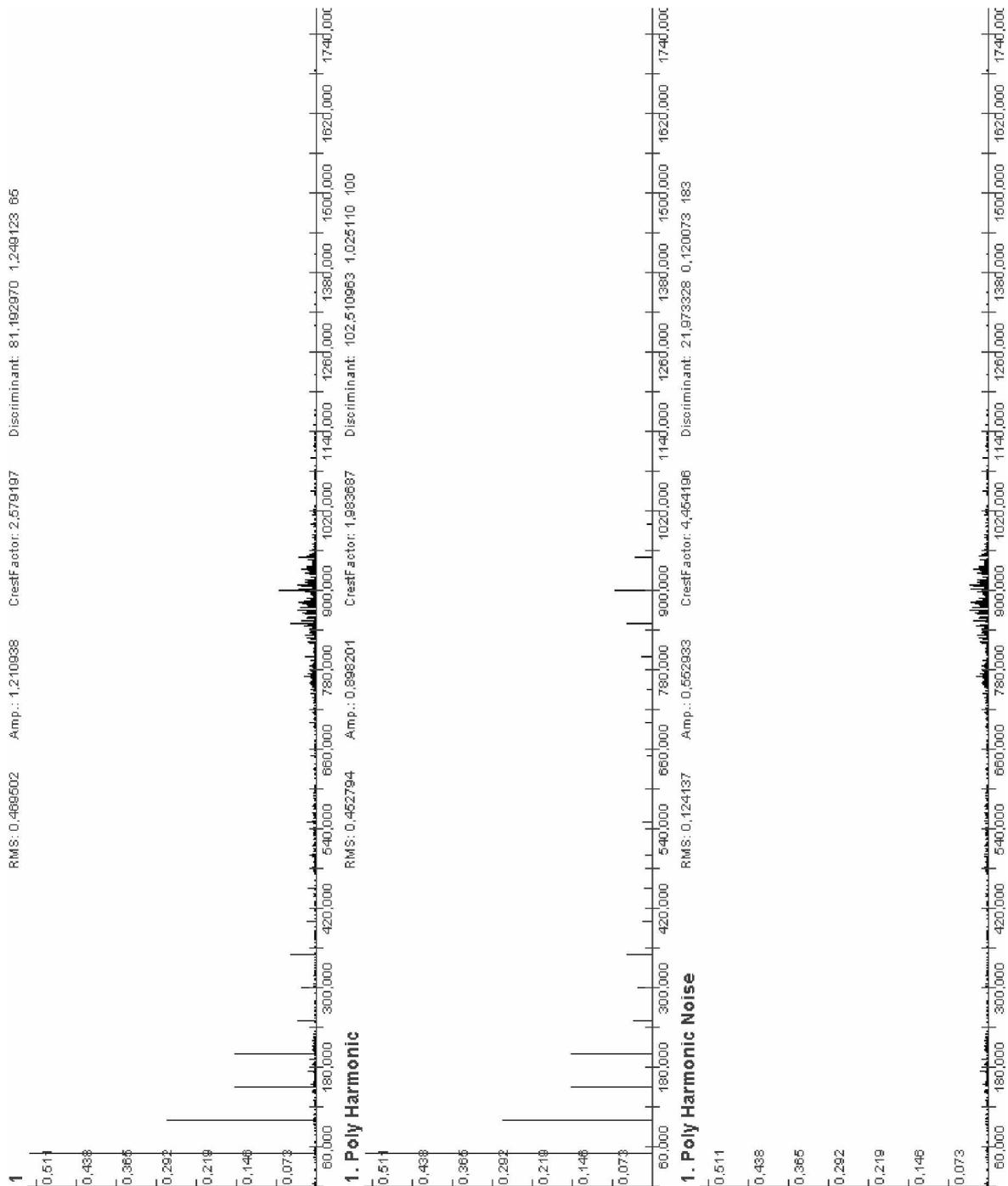


Рис. 2. – Амплитудный спектр вибросигнала в единицах виброускорения, полученного при исследовании подшипниковой опоры генератора мощностью 100 МВт, ее периодической и шумоподобной составляющих (ось абсцисс – частота, c^{-1} ; ось ординат – виброускорение, m/c^2)

На рис. 3 показан исходный вибрационный сигнал, его периодическая и шумоподобная составляющие в единицах виброускорения. Если принять $k_e = 1,5$, то для рассматриваемой ситуации: $a_p = 1,5 \cdot 2,33 \cdot 3,34 = 11,67 m/c^2$, округлив это значение, получим: $a_p = 12 m/c^2$.

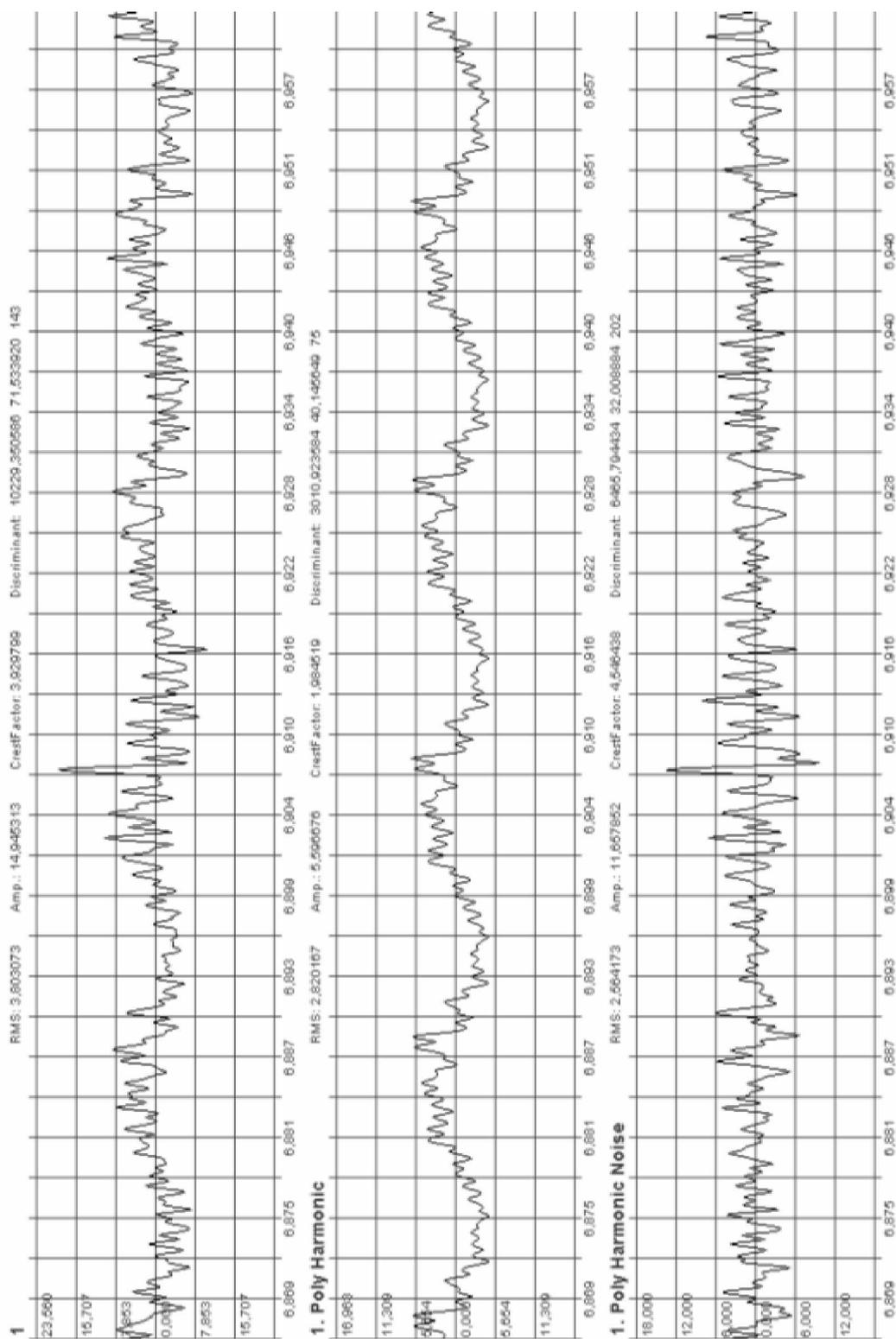


Рис. 3. – Форма исходного вибрационного сигнала, его периодической и шумоподобной составляющих в единицах виброускорения при обнаружении возмущений путем сравнения с уровнем, равным 12 м/с^2 (ось абсцисс – время, с; ось ординат – виброускорение, м/с^2)

Таким образом, сравнивая абсолютные значения шумоподобной составляющей с уровнем всплеска a_p и, обнаруживая превышения этого уровня, локализуются моменты всплесков и ударов, присутствующих в исходном сигнале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балицкий, Ф. Я. Неразрушающий контроль: справочник. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий и др. – М. : Машиностроение, 2005. – 485 с.
2. Бранцевич, П. Ю. Компьютерные системы и комплексы обработки вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич. – Минск : Бестпринт, 2023. – 282 с.
3. Brancevich, P. Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system / P. Brancevich, X. Miao, Y. Li // 20th International Congress on Sound and Vibration. Bangkok, Thailand, 7–11 July 2013. – USA: Curran Associates, Inc., 2013. – P.612–619.
4. Бранцевич, П. Ю. Цифровая обработка вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич. – Минск : Бестпринт, 2022. – 297 с.
5. Brancevich, P. Detection of vibration disturbances during the analysis of long realisations of vibration signals / P. Brancevich, Y. Li // 25-th International Congress on Sound and Vibration 2018 (ICSV 25). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2018. – P.2736-2743.

Контакты:

branc@bsuir.edu.by (Бранцевич Петр Юльевич)