

# К методу визуализации полигармонических колебаний конструкций

- **Лямин А. А.**, завод “Электросила”, Санкт–Петербург
- **Гулай С. Л.<sup>1</sup>**, Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт–Петербург
- **Верховцев Д. А.**, Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт–Петербург
- **Чишко С. Д.**, Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт–Петербург

Рассмотрен опыт применения метода визуализации полигармонических колебаний, базирующегося на использовании современных средств фото- и видеорегистрации. Математическая обработка высокоскоростной видеозаписи колебаний исследуемого объекта позволяет увеличить масштаб регистрации колебаний с амплитудой несколько десятков микрометров до уровня, воспринимаемого невооружённым глазом, что даёт возможность увидеть общую картину вибрационного состояния конструкции и, таким образом, определить пути оптимизации. Рассматриваемый метод апробирован на ряде объектов электроэнергетики.

**Ключевые слова:** визуализация, вибрация, усиление, гидрогенератор, турбогенератор, оптический поток.

Для ряда отраслей промышленности вибрационное состояние оборудования является одним из основных критериев его качества и надёжности. Обеспечение низкого уровня вибрации нередко является сложной многофакторной проблемой. Опыт эксплуатации электрических машин показывает, что установление причины повышенного уровня вибрации, организация и выполнение мероприятий по его снижению являются сложной задачей, нередко требующей применения специальных методов.

Существуют различные способы оценки вибрационного состояния. Чаще всего в производственной и исследовательской практике предпочтение отдаётся датчикам вибрации, деформации или силы. Однако нередко полезно не только измерить, но и “увидеть” вибрацию. Вопрос визуализации колебаний решается известными способами: контурная характеристика, стробоскопирование, эксплуатационная форма деформаций и др. Высокая трудоёмкость, низкая чувствительность или универсальность – отдельные недостатки каждого метода, сильно ограничивающие область их применения [1].

В настоящей работе предложен метод, сводящий к минимуму эти факторы. Визуализация полигармонических колебаний выполняется на базе математической обработки записи видеоряда колебаний исследуемого объекта по алгоритму [2]. В результате достигается визуальное увеличение масштаба вибраций на видеозаписи до значений, воспринимаемых невооружённым глазом. Визуализация колебаний, амплитуда которых может составлять несколько десятков микрометров, даёт

возможность увидеть общий характер поведения различных механических систем, в частности электрических машин, турбо- и гидрогенераторов, в необходимом диапазоне частот.

Данная работа имеет своей целью показать принципиальный диапазон возможностей предложенного метода на примере вращающихся электрических машин, для которых исследуемые частоты обычно составляют 20 – 200 Гц, а размах колебаний – 10 – 1000 мкм.

**Техническая составляющая метода.** При условии получения качественной видеозаписи, метод позволяет визуализировать настолько малые колебания, что граница колеблющегося объекта не пересекает пределы одного пикселя. Видеофиксация и математическая обработка столь малых изменений возможна при наличии необходимых параметров камеры, освещения и монтажа.

Для обеспечения нормальной экспозиции матрицы без помех от переменного освещения, необходимо использовать мощный источник постоянного света. С этой целью в помещении отключают лампы, питаемые переменным током, а исследуемый объект подсвечивают светодиодными прожекторами. Связанно это с тем, что изменяемая во времени освещённость объекта воспринимается, как его колебания с частотой мерцания. Крепление и установка выполняются так, чтобы сторонние вибрации или воздушные потоки не передавались на видеокамеру. В принципе, при несоблюдении описанной рекомендации, возможно применение цифровой стабилизации изображения, но в этом случае будет исключена информация об абсолютной вибрации объекта, выбранного в качестве неподвижного базиса.

<sup>1</sup> Гулай Станислав Леонидович: uzu@bk.ru

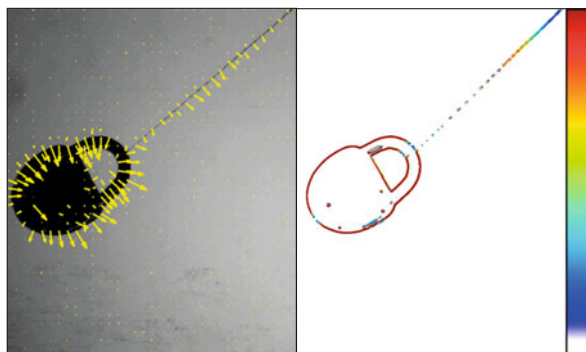


Рис. 1. Распределение векторного поля скоростей (слева) и амплитуда скорости при движении груза слева направо (справа)

Ключевым элементом реализации метода является использование высокоскоростной камеры. Современный рынок предлагает камеры с широким диапазоном характеристик и возможностей, поэтому проблема выбора решается конкретными техническими условиями, формирующими следующие критерии:

1. *Тип матрицы.* Для обработки пригодны как цветные, так и монохромные видеозаписи. Главное и существенное отличие цветной видеокамеры от монохромной – светочувствительность матрицы. При цветной записи массив светофильтров осуществляет цветоделение, что неизбежно приводит к потере контрастности [3]. Отметим, что если не требуется анализ цветовых характеристик, предпочтительно использовать монохромную матрицу, которая позволяет фиксировать колебания меньшей величины.

2. *Частота кадров.* Выбор количества сменяемых кадров записи в секунду непосредственно связан с исследуемым диапазоном частот вибрации и должен быть определен значением, не менее чем в 2 раза выше изучаемой частоты [4]. Так, если рассматриваемая частота составляет 100 Гц, то кадровая частота съёмки должна быть более чем 200 кадров в секунду. Также важно, чтобы основная частота колебаний и её гармонические составляющие не располагались вблизи выбранной частоты съёмки, так как это может привести к нежелательному возрастанию погрешности при воспроизведении процесса [5, 6].

3. *Разрешение матрицы.* Разрешающая способность матрицы определяет детализацию изображения, а элементарное поле зрения – охватываемый одним пикселем размер. По характерным габаритам исследуемых конструкций этот размер выбирался приблизительно 1 мм на 1 пикс и позволял при глубине цвета 8 бит зафиксировать колебание амплитудой около 15 мкм (для шкалы градаций серого цвета теоретический предел –  $2^{-8}$  мм  $\sim$  4 мкм).

4. *Объём памяти.* Для исключения помех при использовании алгоритмов сжатия данных с поте-

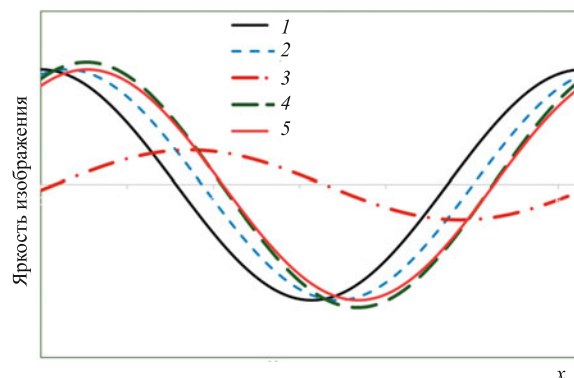


Рис. 2. Увеличение яркости изображения двумя методами:

1 –  $i(x, 0) = f(x)$  – начальная яркость изображения; 2 –  $i(x, t) = f(x - \delta)$  – конечная яркость; 3 –  $B(x, t)$  – изменение яркости; 4 – увеличение яркости изображения при использовании линейного метода; 5 – на основе сдвига фаз

рями желательно применять камеры с записью в формате RAW. Данный формат в совокупности с большим разрешением и частотой записи является громоздким. Например, необходимый объём внутренней памяти при длительности записи 1 с с кадровой частотой 300 и разрешением  $2048 \times 1080$  пикс составляет 0,63 Гб. Исходя из этого, целесообразно выбирать камеру с достаточным объёмом встроенной памяти и портом для скоростной передачи данных.

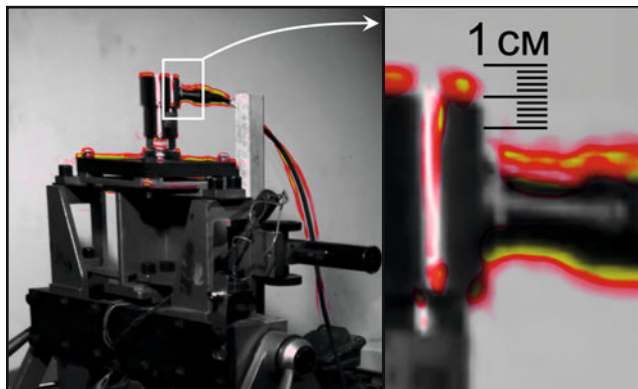
**Математическая обработка.** После того как запись получена, необходимо провести математическую обработку видеофайла. Алгоритм реализован специалистами Массачусетского технологического института в программном пакете MATLAB и основан на обработке фазы видеоряда [7].

Для регистрации видимого движения объектов существует несколько способов. Например, можно анализировать кадр целиком и выделять перемещение границ объекта от пикселя к пикселю. Это наглядно видно на примере оптического потока [8] маятника (рис. 1), где представлено поле мгновенных скоростей между двумя кадрами [9].

Однако такая обработка подходит для видимого перемещения объекта, поэтому в нашем случае необходимо применять другой метод, называемый Эйлеровым с использованием теоремы запаздывания [10]. Характерной особенностью этого метода является то, что вместо линейного усиления изменений яркости пикселей увеличиваются их фазовые сдвиги, и принципиально он подобен локальной версии преобразования Фурье [11].

Сравнение двух методов иллюстрируется рис. 2, где представлено изменение яркости изображения  $i(x, t)$  по координате  $x$  и времени  $t$ . Яркость изображения может быть выражена через функцию перемещения  $\delta(x, t)$ :

$$i(x, t) = f[x - \delta(x, t)].$$



**Рис. 3. Вибростенд с амплитудой колебания стола 50 мкм при частоте 50 Гц:**

красным и жёлтым цветами отмечен след колебания; усиление масштаба виброперемещения в 100 раз соответствует перемещению в видеоряде на 5 мм

При допущении малого значения  $\delta(t)$ , функцию  $i(x, t)$  можно разложить в ряд Тейлора, ограничившись первым членом:

$$i(x, t) \approx f(x) - \delta(x, t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}.$$

Так как  $i(x, t) \approx f(x)$ , то изменение яркости вычисляется по формуле:

$$B(x, t) = i(x, t) - i(x, 0) \approx -\delta(x, t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}.$$

После увеличения  $B(x, t)$  на коэффициент  $\alpha$ , яркость примет вид (рис. 2, кривая 4):

$$i'(x, t) \approx f(x) - (1 + \alpha) \delta(x, t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}.$$

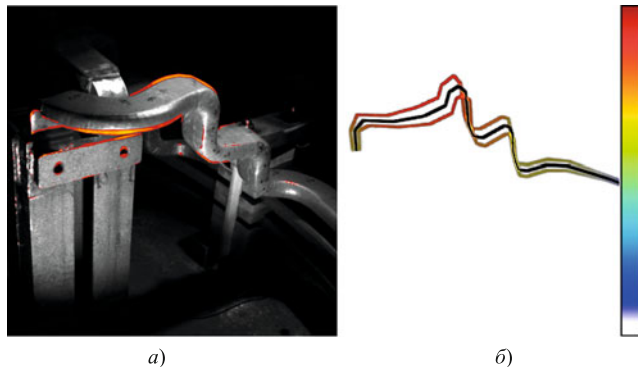
В свою очередь, метод на основе сдвига фазы (рис. 2, кривая 5) даёт:

$$i'(x, t) = f[x - (1 + \alpha) \delta(x, t)]$$

и позволяет с высокой точностью обрабатывать изображения.

Связано это с тем, что обработанная линейным методом видеозапись при больших коэффициентах усиления неизбежно будет содержать шум и размытые границы объектов (на рис. 2 иллюстрируется увеличением амплитуды кривой 4 относительно кривой 1) [11]. Более подробная информация о пирамидах изображений с управляемой направленностью [12] или Рисса [13], как основе для увеличения масштаба колебаний, находится на сайте проектов csail.mit.edu.

**Примеры использования.** Поскольку в формате статьи невозможно показать анимацию движения, для удобства представления результатов выполнена обработка итогового видео с формированием следа колебания объектов. На рис. 3 показан результат обработки видеоряда вертикальных ко-



**Рис. 4. Вибрационные испытания макета соединительной шины обмотки статора при частоте 83 Гц и амплитуде 50 мкм:**

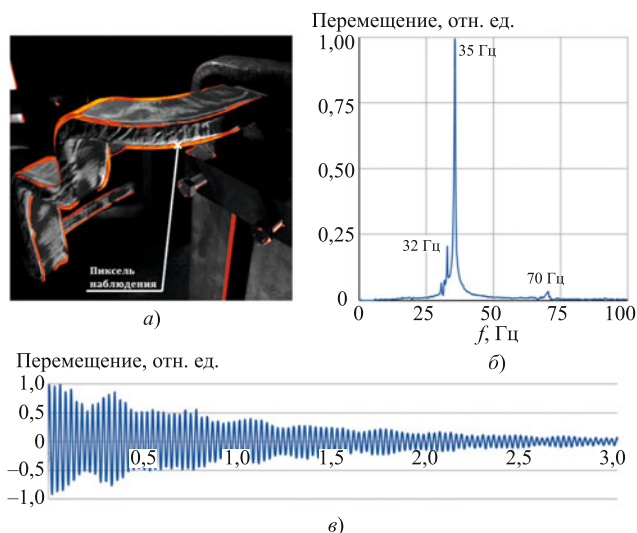
*a* – представлен монтаж визуализации вибрации с коэффициентом усиления 240; *б* – форма колебания, полученная модальным анализом (кривой чёрного цвета отмечено неподвижное положение шины, двумя цветными – максимальные отклонения от неё во взаимно противоположных направлениях)

лебаний вибростенда с установленным сверху датчиком при частоте 50 Гц и амплитуде 50 мкм. Коэффициент усиления принят 100 для диапазона частот  $(50 \pm 5)$  Гц, что позволило увеличить масштаб регистрации перемещения до 5 мм. Следует отметить, что процесс обработки видеоряда включает полосовой фильтр, пропускающий заданный диапазон частот, и каждая итоговая реализация увеличения масштаба колебаний содержит только интересующие частоты.

На рис. 4 показаны результаты обработки видеоряда вибрации с коэффициентом усиления 240 и модальный анализ макета соединительной шины обмотки статора при частоте 83 Гц. Для модального анализа выполнена установка локальных датчиков вдоль шины. Сравнение рисунков свидетельствует о подобии форм колебаний, полученных двумя методами.

На рис. 5 представлено свободное колебание макета соединительной шины обмотки статора после удара (общая продолжительность записи 3 с). На рис. 5, *a* показан результат обработки видеоряда в течение 1 с после удара (по условию выбранной длительности допустимо считать, что колебания являются квазистационарными), на рис. 5, *б* – график затухания колебания пикселя на границе шины обмотки статора и стационарного фона, на рис. 5, *в* – спектр на основе дискретного преобразования Фурье выбранного пикселя. В спектре преобладают частоты 32, 35 и 70 Гц – те же самые частоты и соотношения их амплитудных значений относительно друг друга измерены пьезоэлектрическими акселерометрами. Данные элемента изображения, как основа для вычисления значений перемещений, подобно датчикам вибраций исследуются многими авторами [14, 15]. Однако более детальная связь изменений данных пикселей и величины перемещения не будет рассматриваться в





**Рис. 5.** Свободное колебание после удара макета соединительной шины обмотки статора с коэффициентом усиления 10 для частоты 35 Гц (а), спектр перемещения выбранного пикселя (б) и затухающие колебания пикселя (в)

данной статье и является темой следующей публикации.

Необходимо добавить, что специфика некоторых объектов затрудняет измерить их вибрацию классическими способами, например, вибрацию токоведущих частей под высоким напряжением. Авторы успешно выполнили съёмку лобовых частей и соединительных шин обмотки статора внутри концевой части корпуса турбогенератора в режиме холостого хода при номинальном линейном напряжении 24 кВ. На данный момент число примеров предложенного метода в эксплуатационных режимах работы ограничено. Таким образом, целесообразна детальная проработка дополнительных аспектов реализации съёмки, учитывающая условия эксплуатации турбогенераторов: высокая температура охлаждающего газа, пары масла, повышенная вибрация мест крепления и др.

Применение метода с анализом обработанных видеозаписей позволило выявить наиболее напряжённые места в ряде конструкций, сформировать рекомендации по уменьшению уровня вибрации и принять конструкторские решения, повышающие общую надёжность. Некоторые видеозаписи доступны на <http://youtube.com/user/krajoff/>.

## Выводы

Метод является новым, оригинальным способом анализа вибраций конструкций и даёт возможность визуализировать картину колебаний в целом. Предлагаемый метод позволяет увеличить масштаб полигармонических колебаний в необходимом диапазоне частот и выполнить независимую обработку каждой отдельной гармоники по

единому исходному видеоряду. Использование метода даёт возможность оптимизировать конструкцию, а также может послужить базой для уточнения ряда нормативных документов.

## Список литературы

1. *De Silva, C. W.* Vibration: Fundamentals and Practice [Text]: Second Edition / C.W. de Silva. – CRC Press, 2006. – P. 476 – 477.
2. *Neal, W.* Phase-Based Video Motion Processing [Text] / W. Neal, M. Rubinstein, F. Durand, W. Freeman // Transactions on Graphics. – 2013. – Vol. 32. – No. 4.
3. *Ayan, C.* Rethinking Color Cameras [Text] / C. Ayan, W.T. Freeman, T. Zickler // IEEE International Conference on Computational Photography, 2014.
4. *Котельников, В. А.* О пропускной способности “эфира” и проволоки в электросвязи [Текст] / В.А. Котельников // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. – Всесоюзный энергетический комитет, 1933.
5. *Коровкин, Н. В.* О применимости быстрого преобразования Фурье для гармонического анализа несинусоидальных токов и напряжений [Текст] / Н.В. Коровкин, С.С. Грицуненко // Изв. РАН. Энергетика. – 2017. – № 2. – С. 73 – 86.
6. *Коровкин, Н. В.* К вопросу о моделировании гармоник низкочастотных сигналов [Текст]: сб. “Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики” / Н.В. Коровкин, С.С. Грицуненко // Материалы Межд. научного семинара им. Ю.Н. Руденко. – 2017. – С. 586 – 595.
7. *David, F.* Computation of Component Image Velocity from Local Phase Information [Text] / F. David, A. Jepsen // International Journal of Computer Vision. – 1990: 77-104.
8. *Sun, D.* Secrets of Optical Flow Estimation and Their Principles [Text] / D. Sun, S. Roth, M.J. Black // IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010.
9. *Gautama, T.* A phase-based approach to the estimation of the optical flow field using spatial filtering [Text] / T. Gautama, M. Van Hulle // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2002. – Vol. 15. – No. 5. – P. 1127 – 1136.
10. *Oppenheim, A. V.* Discrete-Time Signal Processing [Text] / A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer. – 2nd Edition. – New Jersey: Prentice Hall Upper Saddle River. – 59 p.
11. *Neal, W.* Revealing and Analyzing Imperceptible Deviations in Images and Videos [Text] / W. Neal. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2016.
12. *Simoncelli, E. P.* The steerable pyramid: A flexible architecture for multi-scale derivative computation [Text] / E.P. Simoncelli, W.T. Freeman // In Image Processing, 1995. Proceedings, International Conference on 1995 IEEE. – 1995. – Vol. 3. – P. 444 – 447.
13. *Neal, W.* Riesz Pyramids for Fast Phase-Based Video Magnification [Text] / W. Neal, M. Rubinstein, F. Durand, W.T. Freeman // IEEE International Conference on Computational Photography, 2014.
14. *Wahbeh, A. M.* A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems [Text] / A.M. Wahbeh, J.P. Caffrey, S.F. Masri // Smart Materials and Structures. – 2003. – Vol. 12(5). – P. 785 – 794.
15. *Bingyou, Liu.* Vision-based displacement measurement sensor using modified Taylor approximation approach [Text] / Bingyou Liu, Dashan Zhang, Jie Guo, Chang'an Zhu // Optical Engineering. – 2016. – Vol. 55(11).