

А.В. Бычков

(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ АКТИВНОМ ВИБРОКОНТРОЛЕ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Показана возможность использования импульсного ультразвукового зондирования для задач вибродиагностики силового электрооборудования. Представлена и описана схема измерительной установки, а также алгоритм корреляционной обработки импульсных УЗ сигналов при активном вибрационном контроле. Для контроля низкочастотных вибраций предложен новый алгоритм обработки сигнала, основанный на анализе изменения формы корреляционной функции.

The possibility of using pulsed ultrasonic probing for problems of vibrodiagnostics of electric power equipment is shown. The scheme of the measuring device is presented and described. A new algorithm for signal processing is proposed to control low-frequency vibrations. It is based on an analysis of the change of the cross-correlation function's shape.

Ключевые слова: ультразвук, виброконтроль, электрооборудование, корреляционная обработка, спектральный анализ.

Keywords: ultrasound, vibration control, electric power equipment, correlation processing, spectral analysis.

Контроль уровня вибраций (электрических аппаратов, трансформаторов, электрических машин) занимает особое место в диагностировании состояния оборудования. Вибродиагностика позволяет выявить различные дефекты и ненормальные режимы работы оборудования [1,2]. Основными методами вибродиагностики являются методы неразрушающего контроля. Для разных способов получения вибросигналов используются различные типы датчиков [3-5]. Существует два направления в измерении: на основе контактных и бесконтактных датчиков [6].

Основную нишу среди контактных датчиков занимают пьезоэлектрические датчики. Однако имеются температурные ограничения при их эксплуатации. Бесконтактные датчики, в зависимости от физических принципов работы, различают магнитные, радиоволновые, оптические и т.д. Оптические методы виброконтроля обладают наилучшей чувствительностью, однако имеют ограничения по условиям применения [4]. Акустические (в т.ч. и ультразвуковые) методы вибрационного контроля, как правило, основываются на измерениях уровня шума самого оборудования в разных условиях и режимах и являются пассивными методами. Измерения на их

основе не обладают достаточной селективностью: не дают информации о локализации и амплитуде вибраций. Необходимы сравнение сигналов и дополнительная исходная информация о вероятных источниках шума. Все указанные методы диагностики и контроля могут применяться в комбинации, дополняя друг друга [2].

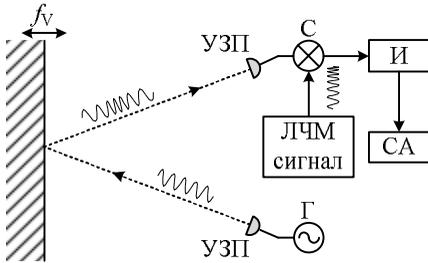


Рис. 1. Схема измерений и обработки сигналов

преобразователем (УЗП), отражается от вертикальной поверхности и поступает на приемный УЗП. Далее уже электрический сигнал подается на смеситель (С), на второй вход которого подается линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) эталонный сигнал. В интеграторе (И) рассчитывается взаимная корреляционная функция (ВКФ) этих двух сигналов. В спектральном анализаторе (СА) выполняется спектральная обработка. Соответствующие программно-аппаратные средства апробированы ранее при анализе потоков газа [7,8].

На рис. 2 изображена ВКФ сигнала в приемном УЗП и ЛЧМ сигнала эталона (а), а также её спектр (б).

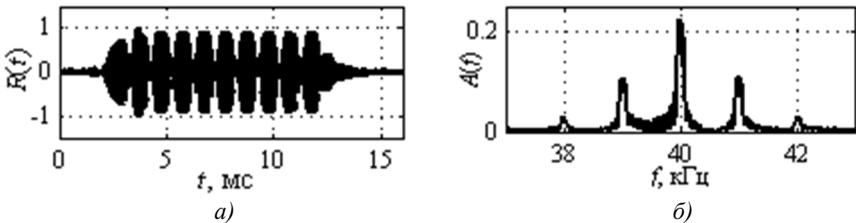


Рис. 2. ВКФ приемного сигнала и ЛЧМ сигнала эталона (а), и её спектральная плотность (б). Длительность - 10 мс. Девияция частоты эталонного сигнала - 40 ± 2 кГц

ВКФ имеет явно выраженную модуляцию. Следовательно, спектр такой функции будет иметь дополнительные боковые пики вокруг основной частоты. Частота колебаний поверхности равна 1 кГц. Соотношение амплитуд пиков в спектре рис. 2,б соответствует амплитуде вибраций 1 мм.

Корреляционная обработка позволяет достигать большей точности в определении параметров вибраций за счет подавления шума в приемном

тракте. Однако в данном случае диапазон частот ограничивается длительностью УЗ импульса. С уменьшением частоты вибраций и, как следствие, относительной длительности зондирующих импульсов точность измерений снижается. Для контроля низкочастотных вибраций алгоритм измерений должен иметь иной принцип.

Минимальная длительность пакета импульсов должна соответствовать десяткам периодов несущей частоты. Для частоты 40 кГц длительность пакета импульсов имеет значение примерно 1 мс [7]. В таком случае, если $f_V \ll 1$ кГц, то выделить биения ВКФ и оценить спектр затруднительно. Но возможно проанализировать искажение формы ВКФ и на основе этого оценить фазовые сдвиги в отраженном от вибрирующей поверхности сигнале. В частности, это возможно сделать по изменению положения «центра тяжести» ВКФ (рис. 3 а и 3 б) [7]. Такой способ обладает высокой чувствительностью к частотно-фазовой модуляции сигнала в приемном УЗП. Он позволяет оценивать фазу даже при частотах вибраций в единицы Герц.

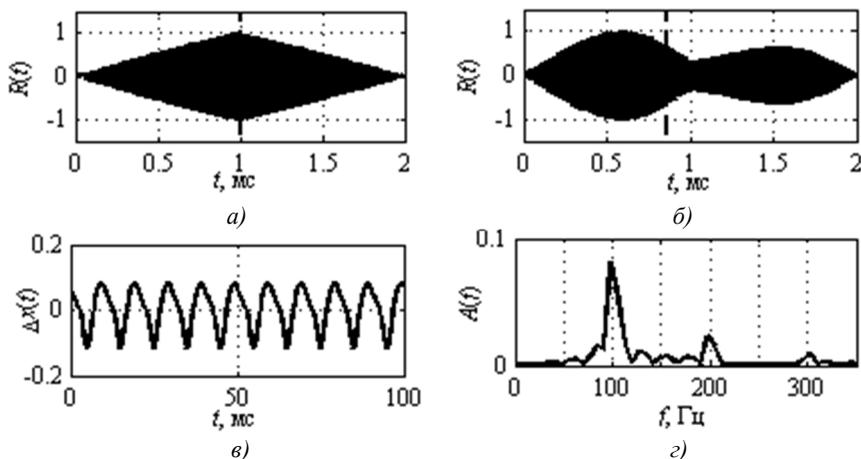


Рис. 3. ВКФ приемного сигнала и ЛЧМ эталонного сигнала и её «центр тяжести» (пунктир): при минимальной (а) и при максимальной частотной расстройке (б), зависимость положения «центра тяжести» ВКФ от времени (в) и спектр этой зависимости (г). Длительность – 1 мс. Девияция частоты эталонного сигнала – $40 \pm 0,2$ кГц

На рис. 3,а и б представлены изменение формы ВКФ и смещения ее «центра тяжести» при длительности пакета импульсов, равной 1 мс, частоте 100 Гц и амплитуде 1 мм. На рис. 3,в и г приведены результаты расчета положения «центра тяжести» ВКФ при изменении фазы колебаний отражающей поверхности и спектр этой зависимости.

При низких частотах вибраций зависимость (рис. 3,в) может быть восстановлена по отдельным измерениям, частота следования которых

соответствует частоте зондирующих УЗ импульсов. В остальном анализ параметров вибраций может производиться аналогично (см. рис. 2).

Разработанная методика вибрационного контроля включает корреляционный и спектральный анализы импульсных УЗ сигналов. Чувствительность при таком измерении зависит от соотношения между частотой и амплитудой вибраций: в высокочастотной области ($f_V > 10$ кГц) большая скорость колебаний отражающей поверхности позволяет регистрировать амплитуду вибраций от единиц микрон [9,10]. Для увеличения точности измерений импульсный режим дает возможность создавать адаптивные алгоритмы при активном виброконтроле.

Список литературы

1. *Матюшкова, О.Ю.* Современные методы виброакустического диагностирования / О.Ю. Матюшкова, В.Ю. Тэттэр // Радиотехника и связь. Омский государственный университет путей сообщения. –2013. –С. 294 – 299.
2. *Русов, В.А.* Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. / В.А. Русов – Пермь: ДимРус, 2012. – 200 с.
3. *Bartoletti, C., Desiderio, M., Carlo, D.Di., Fazio, G., Muzi, F., Sacerdoti, G., Salvatori, F.* Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers. / C. Bartoletti, M. Desiderio, D.Di. Carlo, G. Fazio, F. Muzi, G. Sacerdoti, F. Salvatori // IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. № 19. С. 221 – 229.
4. *Sapozhnikov, O.A., Morozov, A.V., Cathignol, D.* Piezoelectric transducer surface vibration characterization using acoustic holography and laser vibrometry. / O.A. Sapozhnikov, A.V. Morozov, D. Cathignol // Proc. IEEE Int. Ultrasonics and UFFC 50th Anniv. Joint Conf., 2004. № 1. С. 161 – 164.
5. *Cristallia, C., Paoneb, N., Rodriguezc, R.M.* Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements. / C. Cristallia, N. Paoneb, R.M. Rodriguezc // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. № 20. С. 1350 – 1361.
6. *Костюков, В.Н.* Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие/ В.Н. Костюков. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
7. *Бычкова, И.Ю.* Цифровая фазовая модуляция и корреляционная обработка ультразвуковых сигналов для импульсных измерений в неоднородной среде. / И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 3. – С. 114 – 119.
8. *Бычкова, И.Ю.* Экспериментальная оценка применимости лучевого приближения при рассеянии ультразвуковых импульсов в турбулентном потоке воздуха / И.Ю. Бычкова, Л.А. Славутский // Нелинейный мир. – 2018. – №4 – С. 11-16.
9. *Николаев, А.А.* Дистанционный контроль ультразвуковых магнитоотрицательных преобразователей противонакипных устройств. / А.А. Николаев, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2008. – № 2. – С. 228 – 232.
10. *Бычков, А.В.* Возможности корреляционной обработки импульсных ультразвуковых сигналов при бесконтактном виброконтроле оборудования электроэнергетики / А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2018. – №3. – С. 24 – 32.

Материал поступил в редколлегию 20.10.18.