

УДК 621.375

Г.Ю. Мартыненко, Ю.Н. Ульянов, А.Н. Пригорнев

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ РОТОРОВ НА МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Обоснована необходимость разработки, предложен и рассмотрен программно-аппаратный комплекс для измерения и анализа динамических характеристик роторов с системами магнитного подвеса. Предложено программное обеспечение, которое включает специальные алгоритмы обработки данных для измерения основных характеристик сигналов, характеризующих виброперемещение точек ротора, а также для построения по результатам их анализа амплитудно-частотных характеристик, спектрограмм и траекторий движения. Возможности комплекса проиллюстрированы на примере его практического применения для исследования динамики ротора в комбинированном магнитном подвесе.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, виброперемещения ротора, магнитный подвес.

Введение

Интенсивное внедрение технологии магнитного подвеса в современном приборостроении, энергетическом и транспортном машиностроении, которое наблюдается в настоящее время, нуждается в развитии экспериментальных методов исследования динамического поведения таких систем. Это необходимо для обоснования достоверности расчетных результатов и подтверждения успешности использования предлагаемых технических решений на практике. В наибольшей степени это касается техники, в которой управляемый магнитный подвес используется для опирания вращающихся роторов. Малое трение в магнитном подвесе позволяет реализовывать в детандерах, ультрацентрифугах и турбокомпрессорах скорости вращения роторов, ограничиваемые только прочностью материалов. Совершенство систем магнитного подвеса соответствует стратегическому направлению развития машиностроения и приборостроения, где благодаря своей экономичности, эффективности и малой стоимости особой привлекательностью отличаются комбинированные магнитные подвесы, в которых совместно с управляемыми магнитными подшипниками используются подшипники на постоянных магнитах.

Обеспечение правильной работы роторных систем с магнитными подшипниками невозможно без принятия в расчет большого числа различных факторов, касающихся особенностей конкретного ротора, включая его динамические характеристики. Решение вопроса об устойчивости движения высокооборотного левитирующего ротора невозможно без наличия данных по оценке дестабилизирующего воздействия на него как традиционных эксплуатационных нагрузок, так и специфических, например, магнитного трения, вызываемого вихревыми токами, а также данных по конфигурации магнитного

поля в рабочем зазоре, обуславливающей силовые характеристики магнитных опор и величину виброперемещений ротора.

В настоящее время разработкой магнитных подшипников с системами управления, т.е. активных магнитных подшипников (АМП), для различных роторных машин занимаются многие известные компании и фирмы. Это, например, российское НИИ «НПП ВНИИЭМ», инновационный центр «Int. Center for Magnetic Bearings» в США, крупная фирма «S2M» во Франции и др. Однако, в перечне предоставляемых ими услуг, связанных с применением магнитных подшипников, полностью отсутствуют предложения свободно распространяемых программных аппаратных комплексов исследовательского типа для контроля, анализа и диагностики работы таких роторных систем. В связи с этим актуальной является разработка специализированного, но в то же время универсального, программно-аппаратного комплекса, позволяющего проверять, настраивать и диагностировать роторные машины с полностью управляемым или комбинированным магнитным подвесом, анализировать их динамические характеристики на этапе доводки новых образцов или находящихся в эксплуатации агрегатов, например, при техническом обслуживании.

1. Направление исследований и постановка задачи

Ключевым аспектом в разработке оптимальных систем управления роторных машин с АМП является анализ динамического поведения данной системы, который требует тщательного учета механических свойств самого ротора и особенностей несущей конструкции корпуса машины, а также закона автоматического управления подвесом и специфики его реализации с помощью конкретной системы управ-

ления. В этой связи становится очевидной необходимость разработки специализированного программно-аппаратного комплекса, с помощью которого по измеренным виброперемещениям ротора на всевозможных режимах работы могут быть апробированы различные алгоритмы управления системы автоматического регулирования положением ротора в подшипниках, уточнены и скорректированы параметры их настройки с целью обеспечения устойчивости движения ротора в требуемом диапазоне рабочих нагрузок.

Целью настоящей работы является разработка и создание программно-аппаратного комплекса для проведения экспериментальных исследований и получения в реальном масштабе времени данных об устойчивости движения ротора в магнитных подшипниках, о динамических характеристиках и режимах работы всей системы, в том числе о возможных резонансах на основной и кратных частотах.

Анализ известных программно-аппаратных средств сбора и обработки информации, таких как, например, PowerGraph от Холит Дейта Системз, WinПОС от НПП «Мера» [1] и SygnalExpress от NI, показал, что их применение для решения поставленной задачи затруднительно в силу ограниченного перечня поддерживаемых модулей сбора данных, недостаточного набора средств для их обработки и визуализации, малой длительности записи сигналов и высокой стоимости программно-аппаратной части. В связи с этим была поставлена задача разработки программно-аппаратного измерительного комплекса с реализацией возможности варьирования параметрами сбора и обработки данных, построения осциллограмм сигналов, их спектрограмм, траекторий движения отдельных точек и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) вращающегося ротора в магнитных подшипниках, а также других динамических характеристик системы.

2. Структура аппаратной части измерительно-анализирующего комплекса

Комплекс включает две основные системы: систему регистрации сигналов виброперемещений контрольных точек ротора и систему анализа этих виброграмм с целью определения динамических характеристик ротора в магнитных подшипниках. В первой системе первичными преобразователями являются либо датчики положения, входящие в состав системы управления АМП, например, индуктивные датчики, которые обычно применяет S2M, либо магнитные сенсоры на эффекте Холла, если измерения производятся вблизи опорных участков ротора в магнитных подшипниках на постоянных магнитах. Блок аналого-цифрового преобразования построен на базе модуля аналого-цифрового преоб-

разователя (АЦП) типа ADA-1406 [2], сопряженного по шине USB со стандартным мобильным персональным компьютером (ПК). Используемый АЦП имеет 8 дифференциальных входных каналов и позволяет производить преобразование с максимальной частотой дискретизации 350 кГц.

Определение отклонения точек ротора в магнитных подшипниках на постоянных магнитах основано на измерении величины напряженности магнитного поля в зазоре этого подшипника с помощью датчика Холла в микросхемном исполнении с элементами усиления и стабилизации. Для измерения частоты вращения ротора в системе используется датчик Холла (магнитоуправляемая микросхема, работающая в ключевом режиме), который выдает импульсы напряжения с частотой, пропорциональной скорости вращения ротора. Управляющим элементом является миниатюрный постоянный магнит, закрепленный на роторе (магнитная метка).

Вторая система – это набор стандартных и специальных процедур и функций, объединенных в единый программный комплекс, предназначенный для регистрации данных о виброперемещениях набора точек ротора и их специального анализа для определения динамических параметров системы.

3. Погрешность измерения

Относительная погрешность измерения сигналов, характеризующих смещение точек ротора, включает три составляющих:

1) Погрешность первичного преобразователя, т.е. датчика – ϵ_d .

Так как рассматривается универсальный программно-аппаратный комплекс измерения и анализа сигналов, позволяющий использовать любые виды датчиков, то погрешность и закон ее распределения определяются конкретным используемым датчиком.

2) Погрешность АЦП - $\epsilon_{АЦП}$.

Составляющие погрешности измерения напряжения для модуля АЦП ADA-1406, согласно технической документации [2], приведены в табл. 1, где МЗР – младший значащий разряд.

Таблица 1
Составляющие погрешности преобразования

Вид погрешности	Значение	Величина
Дифференциальная нелинейность преобразования	$\pm 1,5$ МЗР	$\pm 0.00594\%$
Интегральная нелинейность преобразования	± 1.5 МЗР	$\pm 0.00594\%$
Общая, $\epsilon_{АЦП}$		$\pm 0.0119\%$

3) Погрешность калибровки – ε_K .

Калибровка сигнала осуществляется методом интерполяции таблично заданной функции, а, следовательно, погрешность можно вычислить только зная истинную функциональную зависимость между физической и электрической величиной первичного преобразователя. Определить эту зависимость можно двумя способами: использовать паспортные данные от производителя первичного преобразователя или экспериментальным путем, воспользовавшись эталонным преобразователем, что позволит также определить и исключить систематическую погрешность измерительного канала. Тогда погрешность калибровки [3] равна:

$$\varepsilon_K = \pm \sqrt{\varepsilon_{\text{И}}^2 + \varepsilon_{\text{Э}}^2}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{И}}$ – погрешность интерполяции, $\varepsilon_{\text{Э}}$ – погрешность, связанная с выбором эталона.

Суммарная погрешность измерительных каналов определяется для каждого конкретного объекта исследования при выполнении калибровки и может быть определена согласно выражению:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\varepsilon_{\text{Д}}^2 + \varepsilon_{\text{АЦП}}^2 + \varepsilon_{\text{К}}^2}. \quad (2)$$

Следует заметить, что величина погрешности, вносимая АЦП, значительно меньше погрешностей типовых датчиков и, на этом основании, ею при расчете можно пренебречь.

4. Программное обеспечение

В качестве среды разработки программного обеспечения (ПО) использован пакет LabVIEW, обладающий широкими возможностями по сбору, обработке и визуализации данных. Эта среда разработки содержит постоянно обновляемую библиотеку драйверов устройств сбора данных, набор специализированных дополнений, а также простой алгоритмический язык программирования. Однако есть ряд задач, которые невозможно решить, используя стандартные модули. Это сохранение и чтение больших объемов данных, поиск стационарных участков на осциллограммах сигналов, построение АЧХ. Поэтому, используя графический язык программирования G, были разработаны дополнительные модули сохранения, чтения, обработки и визуализации данных, которые позволили вести обработку данных практически неограниченной длительности, а также проводить ряд ранее недоступных видов анализа данных.

В разработанном приложении реализованы модули сбора, обработки, сохранения и чтения данных. В случае, если к аппаратному комплексу не подключен модуль АЦП, программа автоматически переходит в режим ограниченной функциональности, в котором доступны все средства для чтения и обработки данных. При подключенном АЦП, в приложении доступны также средства для сбора и сохра-

нения результатов измерения.

Дополнительно, с целью расширения области использования комплекса в программе реализована настройка количества каналов, установка диапазона измерения и частоты дискретизации. Для этого разработан специальный графический интерфейс, посредством которого пользователь осуществляет предварительную настройку или загрузку параметров обмена, после чего конфигурирование АЦП осуществляется в автоматическом режиме – через функции динамической библиотеки драйвера.

Для конвертирования регистрируемого в кодах АЦП сигнала в конкретные физические величины в разработанном ПО реализованы модули калибровки, позволяющие использовать как линейные, так и нелинейные характеристики преобразования. Для калибровки может использоваться один из трех методов интерполяции [4 – 6]:

- кусочно-линейная;
- сплайном;
- кусочными полиномами Эрмита.

5. Измерение частоты сигналов

На рис. 1 представлено главное окно программы с результатом работы специально разработанного алгоритма измерения частоты сигнала. Здесь тонкой линией показана осциллограмма сигнала, а жирной – его частотный ход. Следует отметить, что для отображения характеристик сигналов используются отдельные шкалы, размещенные слева и справа от графика.

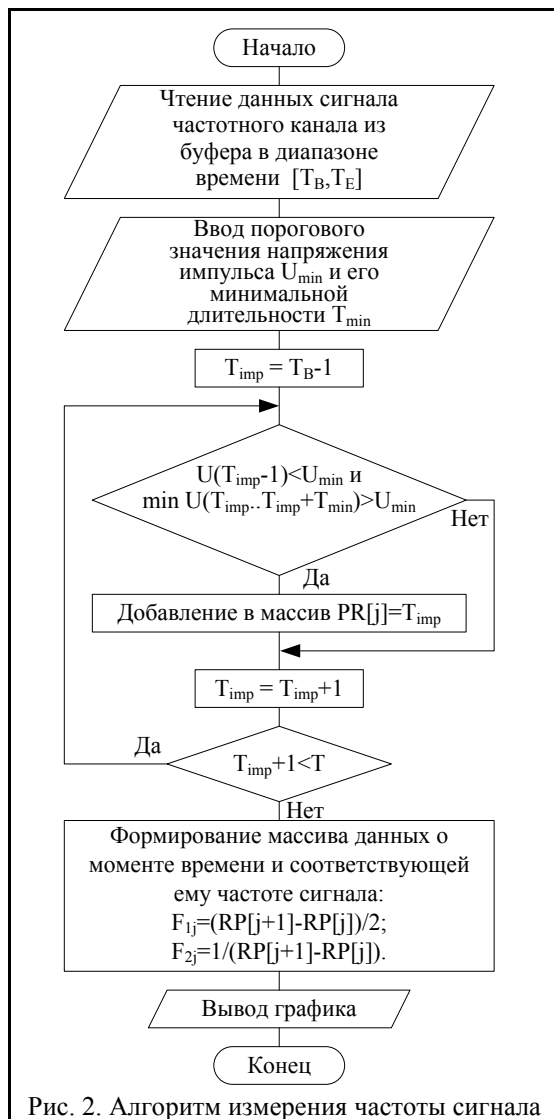


Рис. 1. Главное окно разработанного ПО с графиками сигнала и его частотного хода

Применение специального алгоритма измерения частоты сигнала связано с тем, что стандартные средства LabVIEW в этом случае работают методом подсчета импульсов за некоторый промежуток времени. Однако такой подход сложно использовать для измерения низкочастотных сигналов, особенно при вариации частоты последних.

Успешное решение этой задачи было найдено благодаря разработанному алгоритму, приведенно-

му на рис. 2, позволяющему определить частоту сигнала для каждого периода (см. рис. 1).



6. Сохранение и визуализация результатов измерений

Одной из важных функций программно-аппаратных комплексов является хранение и восстановление данных. Разработчики ПО таких комплексов часто ограничивают длительность записи сигналов, что связано с особенностями работы приложения с доступным объемом оперативной памяти ПК при чтении и визуализации данных. В предлагаемом ПО устранены ограничения в отношении объема сохраняемой информации.

Для этого были созданы специальные модули записи, чтения и визуализации данных, при использовании которых запись ведется в кодах АЦП, за счет чего обеспечивается минимизация размера файлов с сохранением возможности восстановления информации без потерь. Каждый файл данных также содержит информацию о частоте дискретизации каналов, параметрах калибровки и измерения частоты сигнала.

Графическая форма представления требует дополнительные затраты оперативной памяти. Известно, что при использовании стандартного монитора (с разрешением 1024×768) для вывода сигналов на экран монитора достаточно 1000 точек на канал. Уменьшение дискретизации сигналов (путем прореживания) до 1000 точек на канал позволяет минимизировать объем оперативной памяти и получить возможность производить чтение и запись сигналов большой длительности. Однако одновременно увеличивается загрузка центрального процессора ПК.

Исходя из основного назначения разработанного измерительного комплекса, он используется для исследования колебаний роторов (и других различных объектов) на стационарных (установившийся процесс) и нестационарных (переходной процесс) режимах. Для этого в ПО реализованы как стандартные, так и специальные алгоритмы построения спектрограмм, АЧХ и траекторий движения ротора.

В процессе аналого-цифрового преобразования осуществляется дискретизация сигнала с частотой выборки f_s [Гц]. Временной интервал между отсчетами (семплами) равен:

$$\Delta t = 1/f_s. \quad (3)$$

Выборки сигнала обозначаются $x[j]$, $0 \leq j \leq N-1$ (то есть существует N отсчетов). При использовании дискретного преобразования Фурье (ДПФ) число отсчетов устанавливается согласно соотношению:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x[j] e^{-i2\pi jk/N}, \quad (4)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

Результирующий выходной сигнал $X[k]$ при $(0 \leq j, k \leq N-1)$ является частотным представлением $x[j]$. Необходимо заметить, что и временное представление x , и частотное представление X имеют всего N отсчетов. Аналогично временному интервалу Δt между выборками x во временной области частотный интервал между компонентами X в частотной области равен:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N\Delta t}. \quad (5)$$

Интервал Δf также именуется как частотное разрешение [4, 6]. Для увеличения частотного разрешения требуется либо увеличить число отсчетов N (с той же f_s), либо уменьшить частоту выборки f_s (при постоянном N).

Поскольку ДПФ – это последовательность комплексных чисел, то оно несет в себе два информационных сообщения: об амплитуде и фазе [1]. Для действительных сигналов ДПФ симметрично относительно $N/2$ (показатель Найквиста) со следующими свойствами: $|X[k]| = |X[N-k]|$. В терминах, которые используются для описания этой симметрии

рии, говорят, что величина $X[k]$ четна, а фаза ($X[k]$) нечетна относительно частоты $\Delta f \cdot N/2$. Конечным эффектом симметрии в ДПФ действительных сигналов является то, что существует копия полезной информации, содержащейся в N комплексных выборках ДПФ. Благодаря этому можно вычислять или визуализировать только половину отсчетов ДПФ реального сигнала, а другая половина может быть найдена, исходя из свойств симметрии.

Прямое применение ДПФ для N выборок данных требует приблизительно N^2 сложных операций. Однако если размер последовательности есть 2 в некоторой степени ($N=2^m$, где $m=1,2,3,\dots$), то вычисление ДПФ может быть сокращено примерно до $N \log_2(N)$ операций. Это делает вычисления ДПФ намного быстрее и в литературе по цифровой обработке сигналов такие алгоритмы называются быстрым преобразованием Фурье (БПФ). К главным преимуществам БПФ относятся скорость выполнения операций и эффективность использования памяти. В отдельных случаях БПФ может быть применено для последовательностей со специфическими длинами (например, равными произведению небольших простых чисел). Однако на практике для обеспечения возможности использования БПФ размер входной последовательности должен соответствовать степени числа 2. Это гарантируется путем добавления в ее конец такого количества нулевых элементов, чтобы общее число отсчетов было равно большему ближайшему значению 2^m .

В программе полный временной интервал сигнала разделяется на подинтервалы – временные окна, а преобразование проводится для них последовательно. Тем самым осуществляется переход к частотно-временному (частотно-координатному) представлению сигналов, что позволяет анализировать специфику нестационарных сигналов [7].

Оконное преобразование выполняется в соответствии с выражением:

$$S(\omega, b_k) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)w(t - b_k)e^{-i\omega t} dt. \quad (6)$$

Здесь $w(t-b)$ представляет собой функцию окна сдвига преобразования по координате t , а параметром b задаются фиксированные значения сдвига.

При сдвиге окон с равномерным шагом $b_k=k\Delta b$, в качестве окна преобразования может использоваться как простейшее прямоугольное окно ($w(t)=1$ в пределах окна и 0 за его границами), так и специальные весовые окна (Бартлетта, Гаусса, Кайзера), обеспечивающие малые искажения спектра за счет граничных условий вырезки оконных отрезков сигналов и нейтрализующие явление Гиббса. Для каждого положения окна на временной оси сигнала вычисляется свой комплексный спектр. Эффективная ширина оконной функции, как правило, сохраняется постоянной по всему интервалу сигнала.

Спектрограммы, полученные методом кратковременного преобразования Фурье (КВПФ), используются для определения частот шумов, поиска возможных резонансных частот на переходных процессах. Стандартный метод КВПФ использует равномерное временное разрешение для расчета спектрограммы. Для нахождения спектрограмм сигнала на заданных временных интервалах был разработан и реализован в программном комплексе специальный алгоритм, который выполняет в автоматическом режиме поиск стационарных участков с последующим расчетом и визуализацией спектрограммы. Его блок-схема приведена на рис. 3.

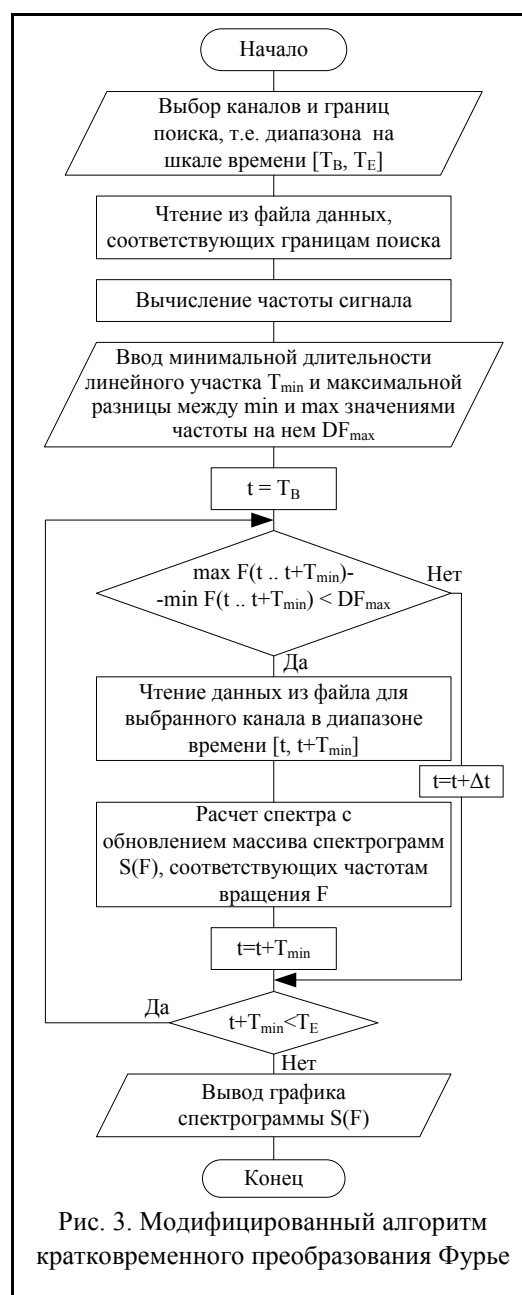
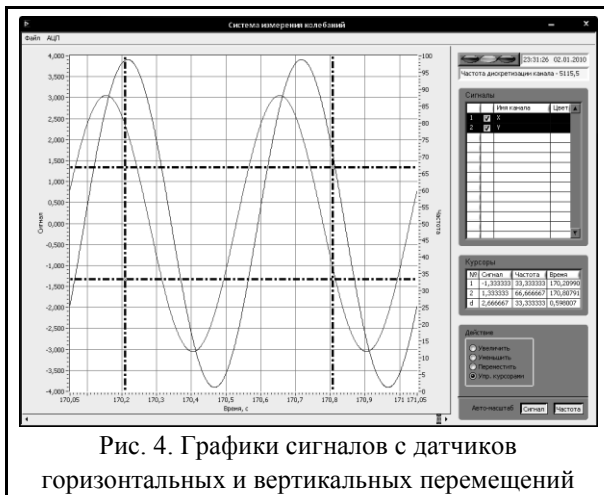


Рис. 3. Модифицированный алгоритм кратковременного преобразования Фурье

В программном комплексе также реализована визуализация двумерной траектории движения по сигналам от двух сенсоров, расположенных в одной

плоскости и производящих измерения во взаимно перпендикулярных направлениях. В качестве примера на рис. 4 показаны сигналы с магнитных сенсоров горизонтальных и вертикальных перемещений, а на рис. 5 – график траектории движения контрольной точки вращающегося ротора.



В разработанном программном комплексе были реализованы модули многоканальной обработки данных для расчета и визуализации амплитудно-частотных характеристик всех опорных участков ротора в магнитном подвесе одновременно по нескольким каналам.

7. Пример практического использования программно-аппаратного комплекса

Разработанный комплекс был применен в экспериментальных исследованиях динамики ротора в комбинированном магнитном подвесе [8], схема лабораторной установки которого приведена на рис. 6. Данный комбинированный магнитный подвес ротора состоит из двух радиальных магнитных подшипников на постоянных магнитах (МПМ) и одного осевого активного магнитного подшипника двухстороннего действия. Кольца МПМ имеют осевую

намагниченность и обеспечивают самоцентрирование в радиальном направлении. В осевом направлении устойчивость обеспечивает АМП. Изменение управляющих напряжений, подаваемых на обмотки, производится системой управления в зависимости от положения ротора (рис. 6), а токи создают необходимое для стабилизации значение магнитной силы.

Цель исследований состояла в измерении и анализе радиальных и осевых перемещений, а также в выявлении особенностей динамики левитирующего вращающегося ротора при таком сочетании пассивных и активных магнитных подшипников.



Лабораторная установка была оснащена аналоговыми магнитными сенсорами на эффекте Холла для контроля положения ротора и дискретным датчиком Холла для измерения его частоты вращения.

Натурные эксперименты по разгону ротора в нестационарном (при линейном изменении скорости вращения) и квазистационарном (с шагом изменения скорости вращения равным 30 об/мин) режимах иллюстрируются данными экспресс-анализа, приведенными на рис. 7, 8. Здесь показан вид главного окна программного комплекса с осциллограммами радиальных перемещений и временным ходом частоты вращения ротора при его разгоне.

Графики АЧХ, построенные на основании измерений горизонтальных и вертикальных перемещений опорных участков ротора в радиальных МППМ при изменении частоты вращения в диапазоне от 0 до 1800 об/мин, приведены на рис. 9. Характер зависимостей свидетельствует о наличии узких полос конструктивного резонанса системы вблизи частот 10, 11, 22 и 30 Гц, что соответствует критическим скоростям вращения ротора, при которых он совершает движение типа цилиндрической и конической прецессий.

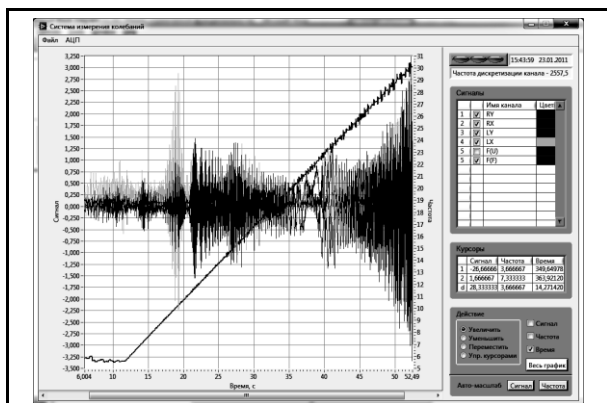


Рис. 7. Графики радиальных перемещений и частоты вращения ротора (нестационарный режим)



Рис. 10. График траектории движения

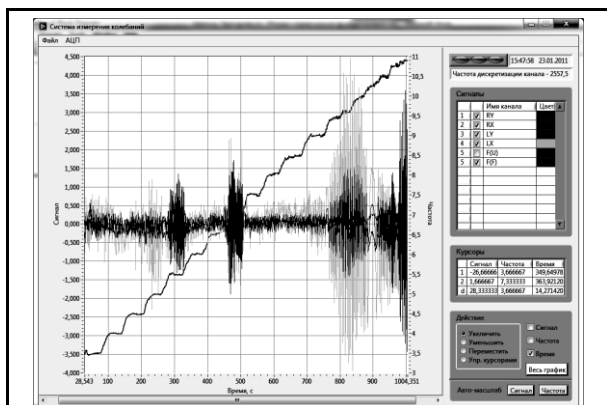


Рис. 8. Графики радиальных перемещений и частотного хода ротора (квазистационарный режим)

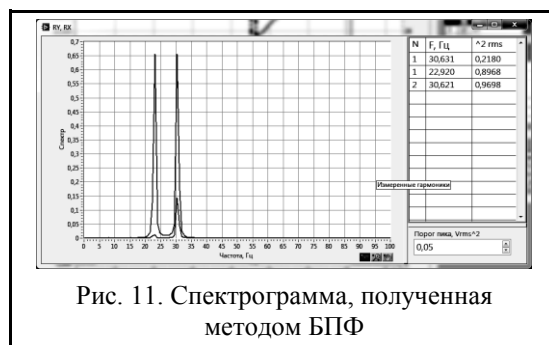


Рис. 11. Спектрограмма, полученная методом БПФ

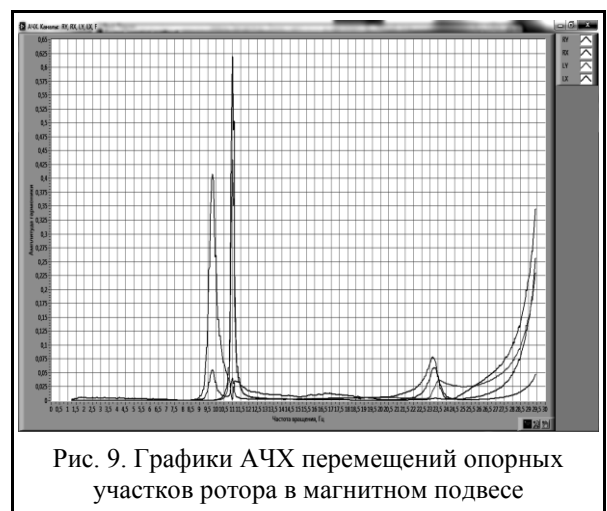


Рис. 9. Графики АЧХ перемещений опорных участков ротора в магнитном подвесе

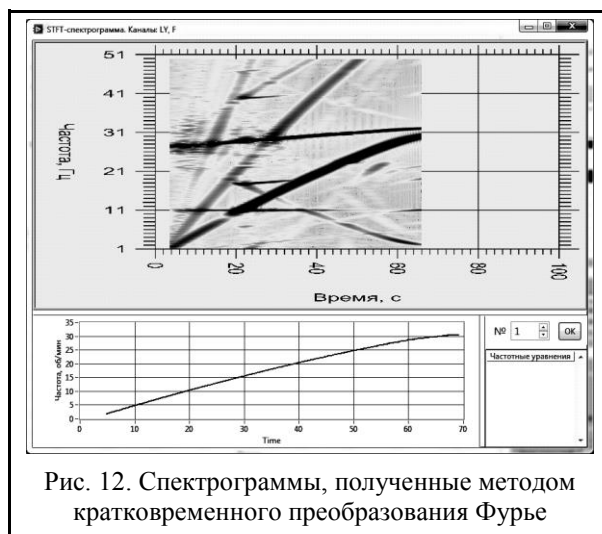


Рис. 12. Спектрограммы, полученные методом кратковременного преобразования Фурье

Вид реальной траектории движения опорных участков ротора лабораторной модели, а также спектрограммы сигнала виброперемещений, полученной методом БПФ для заданной частоты вращения, представлены на рис. 10, 11 соответственно.

Для анализа спектра частот при разгоне ротора в нестационарном режиме могут быть использованы частотно-временные спектрограммы, полученные методом КВПФ и представленные на рис. 12.

На спектрограмме по оси абсцисс отложена ось времени, по оси ординат – частоты спектра, а цветом отмечены амплитуды гармоник. В нижней части окна изображена разгонная характеристика, т.е. зависимость частоты вращения от времени.

Такие спектрограммы позволяют изучать изменение спектра частот вибрации от времени и частоты вращения при разгоне ротора, торможении, а также при вариациях его скорости вращения для выявления возможных в системе резонансов.

Как известно, нестационарные колебания роторов отличаются от колебаний в стационарном режиме. Поэтому для сравнительного анализа также возможно использование спектрограмм, построен-

ных модифицированным методом КВПФ (рис. 3) и представленных на рис. 13. Они являются вариантом частотной диаграммы (Кэмпбелла) и относятся к одной из основных характеристик, используемых при анализе роторной динамики.

Получение подобных данных весьма важно для поиска неисправностей в эксплуатируемых машинах и совершенствования новых систем магнитного подвеса высокооборотных роторов.

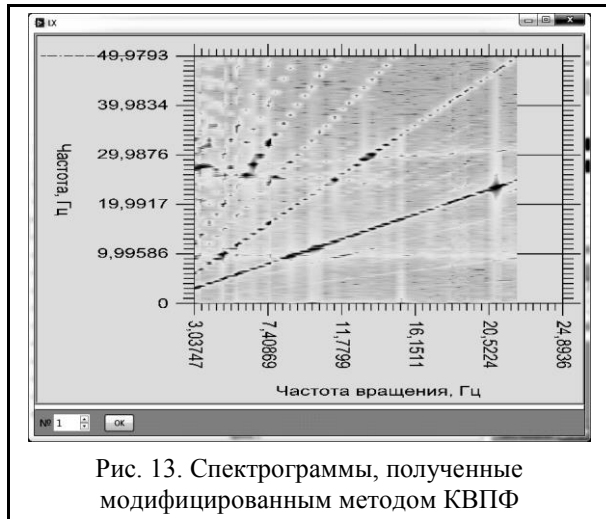


Рис. 13. Спектрограммы, полученные модифицированным методом КВПФ

Выводы

Разработан программно-аппаратный комплекс для проведения исследований вибрационных характеристик роторов в магнитных подшипниках. Аппаратная часть позволяет подключать различные типы датчиков механических величин и выполнять измерение сигнала с максимальной частотой дискретизации до 350 кГц. Программные средства обеспечивают возможность настройки, хранения, загрузки и обработки данных, для реализации которых доступны как стандартные модули анализа, так и специаль-

но разработанные. Мобильность комплекса определяется только особенностью используемой ЭВМ. Он может считаться портативным при использовании современных ПК класса Notebook.

Созданный аппаратно-программный комплекс протестирован при анализе динамики ротора лабораторной модели с комбинированными магнитными подшипниками. Данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, использованы для настройки параметров системы управления магнитным подвесом с целью увеличения устойчивости ротора на режимах, близких к резонансным.

Список литературы

1. WinПОС – Пакет обработки сигналов. Руководство пользователя. – Королев: Мера, 2009. – 174 с.
2. ADA-1406. Модуль ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов. Руководство пользователя. – К.: ООО «Холит Дэйта Системс», 2007. – 17 с.
3. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин / А.Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1974. – 108 с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – [2-е изд.]. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.
5. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х т. / Ж. Макс. – М.: Мир, 1983. – 293 с.
6. Оппенгейм А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – [изд. 2-е, испр.]. – М.: Техносфера, 2007. – 856 с.
7. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1978. – 831 с.
8. Ульянов Ю.М. Система управління осьовим рухом ротора на комбінованому магнітному підвісі з пасивними радіальними і активним осьовим підшипниками / Ю.М. Ульянов, Г.Ю. Мартиненко, М.М. Смирнов // 36. наук. пр. – Х.: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 97. – С. 107-118.

Поступила в редколлегию 5.07.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Львов, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛІЗУ ВІБРОПЕРЕМІЩЕНЬ РОТОРІВ НА МАГНІТНИХ ПІДШИПНИКАХ

Г.Ю. Мартиненко, Ю.М. Ульянов, О.М. Пригорнев

Обґрунтовано необхідність розробки, запропоновано і розглянуто програмно-апаратний комплекс для вимірювання та аналізу динамічних характеристик роторів з системами магнітного підвісу. Запропоновано програмне забезпечення, яке включає спеціальні алгоритми обробки даних для вимірювання основних характеристик сигналів, що характеризують вібропереміщення точок ротора, а також для побудови за результатами їх аналізу амплітудно-частотних характеристик, спектрограм і траєкторій руху. Можливості комплексу проілюстровані на прикладі його практичного застосування для дослідження динаміки ротора в комбінованому магнітному підвісі.

Ключові слова: програмно-апаратний комплекс, вібропереміщення ротора, магнітний підвіс.

HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR ANALYSIS OF ROTORS ON MAGNETIC BEARINGS VIBRODISPLACEMENTS

G.Y. Martynenko, Y.N. Uliyanov, A.N. Prigornev

The necessity of development is grounded, offered and considered the hardware-software complex for measuring and analysis of rotors dynamic characteristic with magnetic suspension systems. The software, which includes special algorithms of data processing for measuring basic characteristics of signals, characterizing vibrodisplacements of the rotor points, is offered, and also for a construction on the results their analysis of the amplitude-frequency characteristics, spectrograms and trajectories of motion. Possibilities of the complex are illustrated on the example of its practical application for research of dynamics of the rotor in combined magnetic suspension.

Keywords: hardware-software complex, rotor vibrodisplacements, magnetic suspension.