

Описано аналітичні та чисельні дослідження з вивчення напружено-деформованного стану ділянки трубопроводу з дефектом у його стінці та ремонтною накладкою в місці знаходження дефекту. Дослідження виконано з використанням скінченно-елементного програмного комплексу інженерного аналізу. Результати представлено у вигляді графіків розподілу переміщень та еквівалентних напружень. Зроблено порівняльний аналіз результатів аналітичного вирішення спрощеної одновимірної задачі та чисельних розрахунків задачі в об'ємній постановці для випадків пружних та в'язкопружних властивостей склопластику.

**Ключові слова:** трубопровід, бандаж, дефект, концентратор напружень.

The analytical and numerical studies of stress-strain state of pipeline with defect in its wall and repair layer in place of defect are described. The study was conducted using the finite element software package of engineering analysis. Results are presented as displacement vectors and distribution graphs of equivalent stress. Comparative analysis of results of analytical solution of simplified one-dimensional problem and numerical calculations in volume formulation in case of elastic and viscoelastic properties of fiberglass are presented.

**Keywords:** pipeline, layer, defect, stress concentrator.

УДК 621.375

*Г.Ю. МАРТЫНЕНКО*, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ МОДЕЛЬНОГО РОТОРА В МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ РАЗНЫХ ТИПОВ**

Описаны экспериментальные исследования по изучению динамики модельного ротора в комбинированном пассивно-активном магнитном подвесе. Исследования выполнены с использованием специализированного программно-аппаратного комплекса. Результаты представлены в виде виброперемещений центров опорных участков ротора, их траекторий движения, спектрограмм, а также амплитудно-частотных характеристик. На основании анализа экспериментальных данных предложена модифицированная конструкция ротора, позволившая снизить амплитуды колебаний при значениях скоростей вращения близких к критическим.

**Ключевые слова:** динамика ротора, магнитные подшипники, критические скорости.

**Введение.** Данная работа является продолжением серии публикаций [1–2], посвященных экспериментальному исследованию динамики ротора в магнитных подшипниках. Эти исследования выполнялись на специально созданной лабораторной установке [3]. В ней реализован пассивно-активный магнитный подвес, который может рассматриваться как вариант опор легких высокоскоростных роторов, например, турбодетандерных и детандер-компрессорных агрегатов. Для сбора и обработки данных был использован раз-

© Г. Ю. Мартыненко, 2013

работанный программно-аппаратный измерительный комплекс [1], который позволяет выполнять построение осциллограмм сигналов, их спектрограмм, траекторий движения отдельных точек и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) вращающегося ротора в магнитных подшипниках, а также других динамических характеристик системы. Экспериментальные исследования динамики модельного ротора выполнялись с использованием методики, подробное описание которой приведено в [2].

**1 Объект и цели исследований.** Целью данной работы, как и работ [1–2], является экспериментальное изучение динамического поведения вращающегося ротора в магнитных подшипниках различных типов и выявление особенностей, вносимых в роторные системы магнитными подшипниками.

Лабораторная установка, в которой реализован комбинированный магнитный подвес ротора, состоящий из двух радиальных магнитных подшипников на постоянных магнитах и одного осевого активного магнитного подшипника двухстороннего действия. Кольца МППМ имеют осевую намагниченность и обеспечивают самоцентрирование в радиальном направлении.

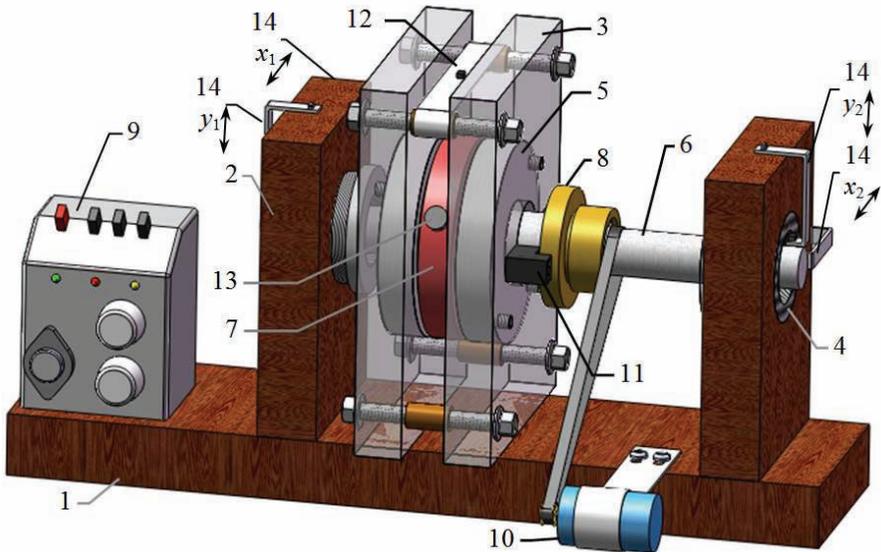


Рисунок 1. Полная геометрическая модель лабораторной установки ротора в МП

Данная лабораторная модель представлена на рис. 1. Она включает в себя основание (1) с четырьмя стойками (2 и 3) для крепления неподвижных колец радиальных МППМ (4) и статоров осевого АМП (5), а также сам ротор из дюралюминия (6), на котором размещены диск осевого АМП (7) из ферромагнитного материала, кольцевые постоянные магниты радиальных МППМ и диск (8) системы регистрации (измерения). На основании размещен

блок управления осевым АМП (9) и электродвигатель (10), а на стойках радиальных МППМ – оптические датчики системы измерения осевого положения ротора (11). Статоры осевого АМП выполнены из стали, каждый с двумя полюсами – внутренним и внешним. Между полюсами статоров АМП в цилиндрических пазах размещены обмотки управления. В центральном положении ротора центры масс подвижных и неподвижных кольцевых магнитов совпадают, а диск находится посередине между статорами.

В осевом направлении устойчивость ротора лабораторной установки обеспечивает АМП, а изменение управляющих напряжений, подаваемых на обмотки, производится системой управления в зависимости от положения ротора [2]. При этом токи создают необходимое для стабилизации значение магнитной силы. Для измерения частоты вращения ротора в системе используется датчик Холла (12) (магнитоуправляемая микросхема, работающая в ключевом режиме), который выдает импульсы напряжения с частотой, пропорциональной скорости вращения ротора. Управляющим элементом является миниатюрный постоянный магнит (13), закрепленный на роторе (магнитная метка на диске осевого АМП). Определение горизонтальных ( $x_1$  и  $x_2$ ) и вертикальных ( $y_1$  и  $y_2$ ) отклонений центров опорных участков ротора в магнитных подшипниках на постоянных магнитах основано на измерении величины напряженности магнитного поля в зазорах этих подшипников с помощью датчиков Холла в микросхемном исполнении с элементами усиления и стабилизации (14). Разгон ротора осуществлялся электродвигателем с изменением угловой скорости вращения в диапазоне от 0 до 3000 об/мин.

Для регистрации данных о виброперемещениях набора точек ротора и их специального анализа с целью определения динамических параметров системы в программно-аппаратном измерительном комплексе использован набор стандартных и специальных процедур и функций, объединенных в единое программное обеспечение [1].

**2 Особенности колебательных явлений в электромеханической системе «ротор в МП».** Для всестороннего исследования динамических процессов, происходящих на переходных и стационарных режимах, было выполнено две серии экспериментов. Первая предполагала получение сведений о поведении ротора при изменении его угловой скорости вращения в указанном диапазоне (разгон и остановка), а вторая – при его установившемся движении (вращение с некоторым фиксированным значением угловой скорости).

Результатом второй серии экспериментов является амплитудно-частотная характеристика, которая получена интерполяцией данных неоднородным В-сплайном и представлена на рис. 2. Она позволяет оценить наличие резонансных режимов в исследуемой области и вид движения ротора, соответствующего различным значениям частоты вращения. Так обнаружены следующие явления: раздвоение и первого ( $\sim 10,5$  и  $\sim 12$  Гц), и второго ( $\sim 22,5$  и  $\sim 33$  Гц) резонансов вследствие неодинаковой жесткости МППМ в горизонтальном и вертикальном направлениях (анизотропия опор) из-за разных по-

ложений статического равновесия ( $x_{1ст} = x_{2ст} = 0$ ,  $y_{1ст}$  и  $y_{2ст} \neq 0$ ) относительно центров подшипников, возникающих при действии силы тяжести; прямая (~10,5 Гц) и обратная (~12 Гц) цилиндрические прецессии, а также прямая (~22,5 Гц) и обратная (~35 Гц) конические прецессии (на рис. 2 показаны формы колебаний, соответствующие этим движениям); срыв колебаний с переходом с одного устойчивого режима на другой устойчивый режим (на рис. 2 заштрихованная область).

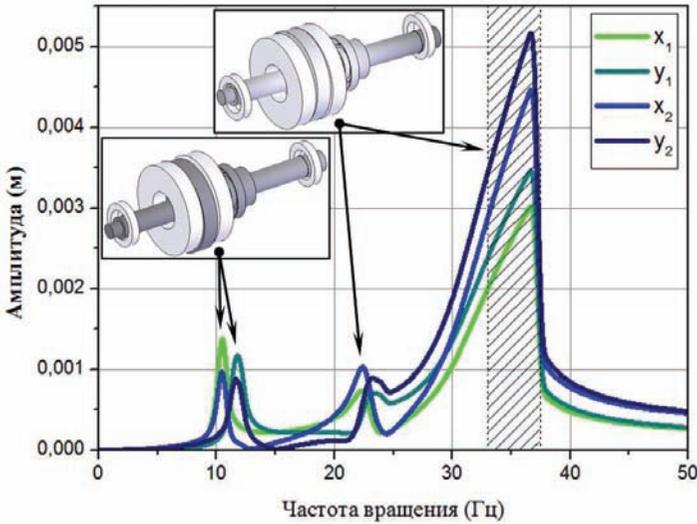


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика ротора лабораторной установки с комбинированным магнитным подвесом

**3 Результаты экспериментального изучения динамики ротора на нестационарных режимах.** Для изучения характеристик нестационарных динамических процессов, происходящих в системе «ротор в МП», выполнялся медленный непрерывный разгон с проведением измерений и фиксацией данных при линейном изменении угловой скорости вращения в диапазоне от 0 до  $30 \times 2\pi$  рад/с (или частоты вращения в диапазоне 0-30 Гц). На рис. 3 приведены осциллограммы радиальных и осевых перемещений центров опорных участков радиальных МППМ и осевого АМП соответственно, а также временной ход частоты вращения ротора при его разгоне.

На рис. 4 представлены частотно-временные спектрограммы радиальных перемещений центров опорных участков МППМ, характеризующие динамические процессы на нестационарных режимах. Они являются результатом порядкового анализа, выполненного методом кратковременного преобразования Фурье (КВПФ) [1] сигналов виброперемещений (см. рис. 3).

Оценивая результаты измерений и обработки данных, представленные в виде тахо-характеристик (рис. 4), можно сделать вывод, что в исследуемом

диапазоне частоты вращения, изменяющейся линейно со временем (нижняя часть окна программы), наблюдаются полигармонические колебания в основном с частотами, кратными к основной частоте возбуждения (вращения) [1].

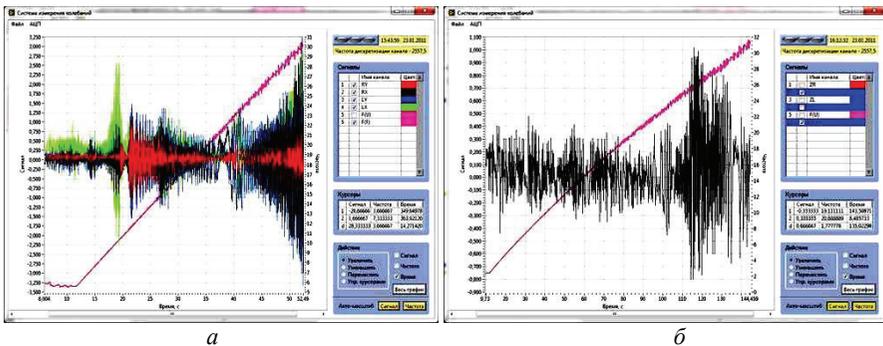


Рисунок 3 – Осциллограммы радиальных (а) и осевых (б) перемещений опорных участков ротора при разгоне в диапазоне частот вращения 0-30 Гц

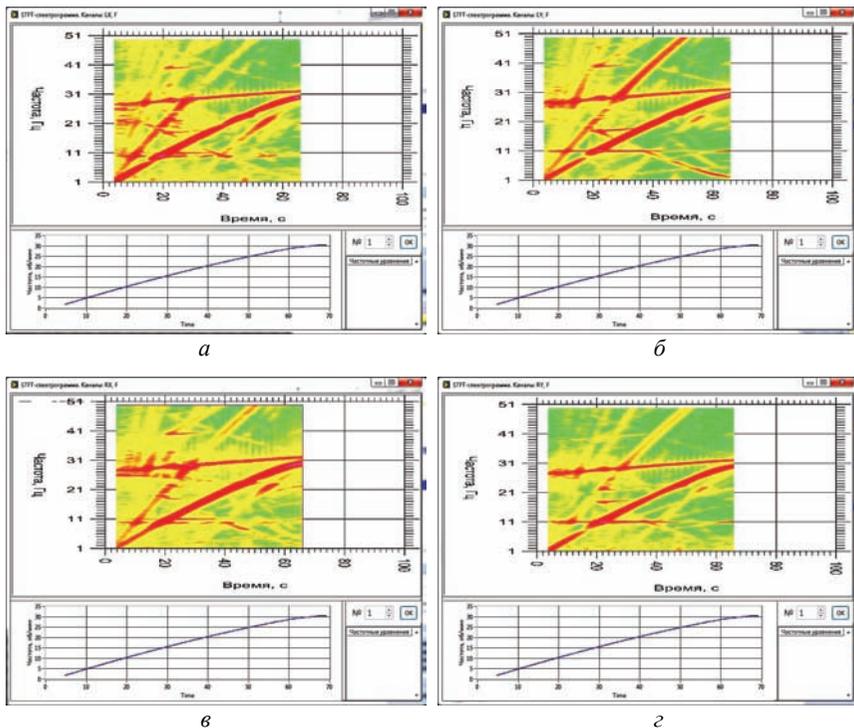


Рисунок 4 – Частотно-временные спектрограммы перемещений центров опорных участков: а – левого горизонтальных ( $x_1$ ), б – левого вертикальных ( $y_1$ ), в – правого горизонтальных ( $x_2$ ), г – правого вертикальных ( $y_2$ )

**4 Результаты экспериментального изучения динамики ротора на квазистационарных режимах.** Для изучения характеристик стационарных динамических процессов, происходящих в системе «ротор в МП», выполнялся разгон с дискретным изменением частоты вращения в диапазоне 0-30 Гц с ее удержанием при проведении измерений и фиксации данных. На рис. 5 приведены осциллограммы радиальных перемещений центров опорных участков радиальных МППМ и временной ход частоты вращения ротора.

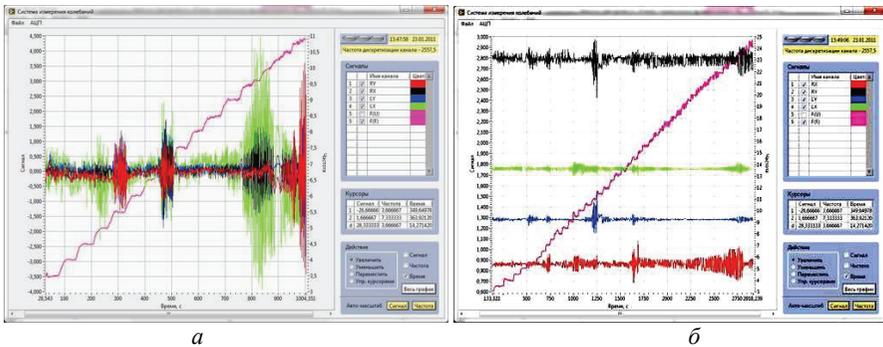


Рисунок 5 – Осциллограммы радиальных перемещений опорных участков ротора в разных диапазонах частот вращения: а – 0-10 Гц, б – 0-30 Гц

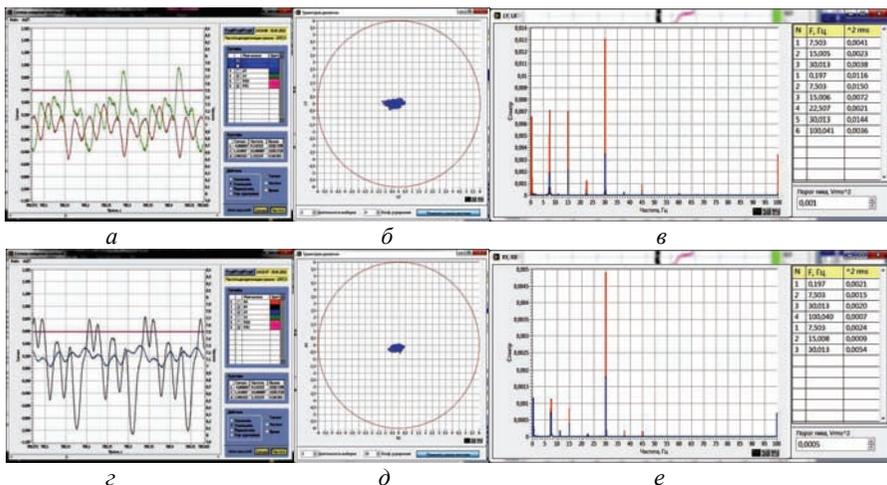


Рисунок 6 – Визуализация результатов измерений и обработки экспериментальных данных, полученных при частоте вращения ротора 8,5 Гц

На рис. 6-11 представлена визуализация результатов измерений и обработки экспериментальных данных, соответствующих некоторым значениям частоты вращения ротора, а именно: виброграммы горизонтальных (а) и вер-

тикальных (г) перемещений левого и правого опорных участков (перемещения по  $x_1, x_2$  и  $y_1, y_2$  с автомасштабированием графиков); траектории движения левого (б) и правого (д) опорных участков (зависимости  $y_1(x_1)$  и  $y_2(x_2)$  с изображением графиков в зазоре МППМ  $\delta_r = 5,5$  мм); спектрограммы отклонений левого (в) и правого (е) опорных участков (БПФ сигналов перемещений по  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$  с автомасштабированием графиков).

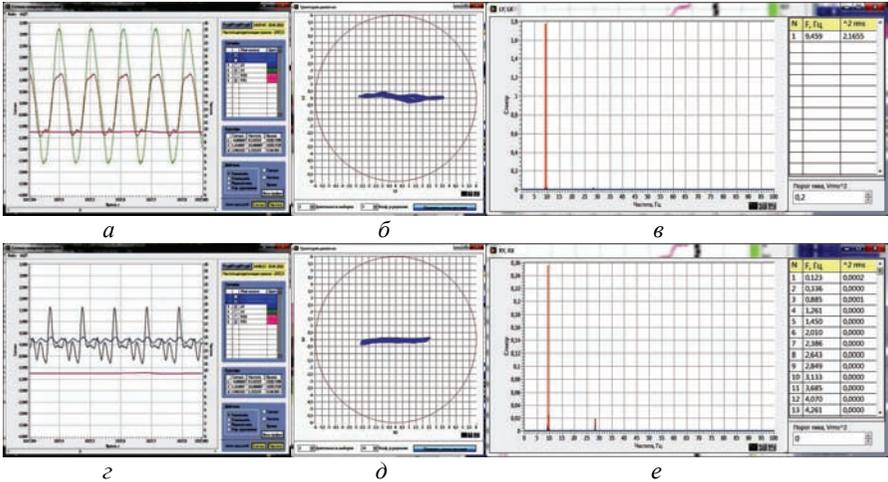


Рисунок 7 – Визуализация результатов измерений и обработки экспериментальных данных, полученных при частоте вращения ротора 10,6 Гц

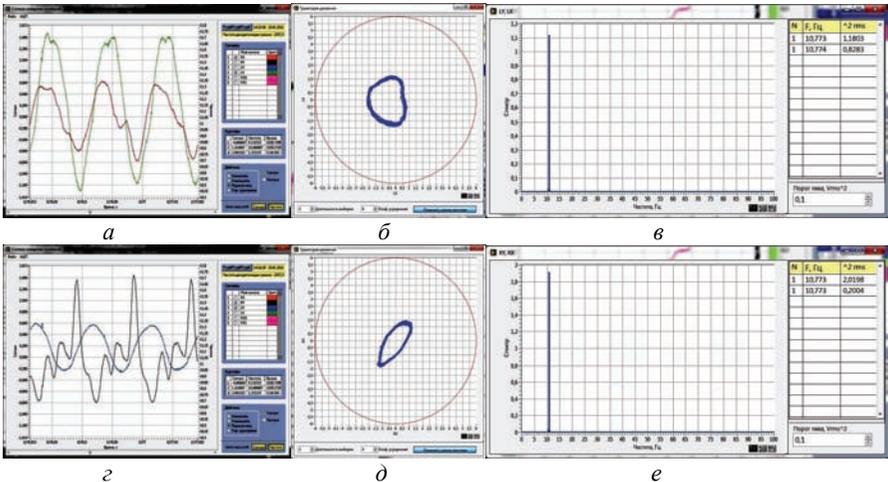
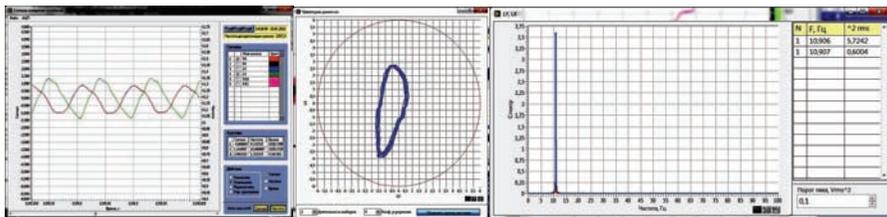


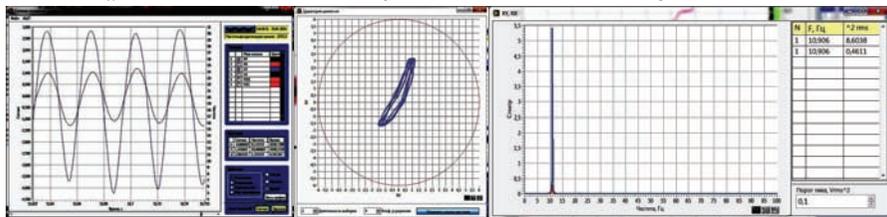
Рисунок 8 – Визуализация результатов измерений и обработки экспериментальных данных, полученных при частоте вращения ротора 11,3 Гц



а

б

в

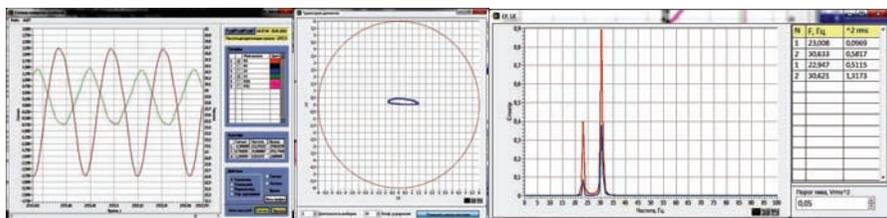


з

д

е

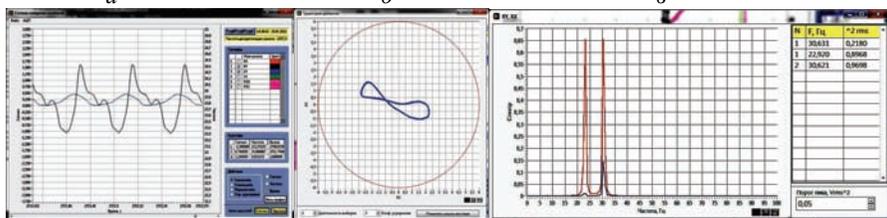
Рисунок 9 – Визуализация результатов измерений и обработки экспериментальных данных, полученных при частоте вращения ротора 11,8 Гц



а

б

в



з

д

е

Рисунок 10 – Визуализация результатов измерений и обработки экспериментальных данных, полученных при частоте вращения ротора 22,4 Гц

Данные осциллограммы, траектории и спектры соответствуют до-, за- и резонансным (критическим) режимам (см. рис. 2). Они полностью подтверждают предположение о раздвоении резонансов и наличие движений типа прямой и обратной цилиндрической и конической прецессий (вследствие анизотропии опор), а также существование полигармонических суб-, супер- и комбинационных колебаний с кратными к основной частотами, причинами которых является нелинейность силовой характеристики МППМ [4].

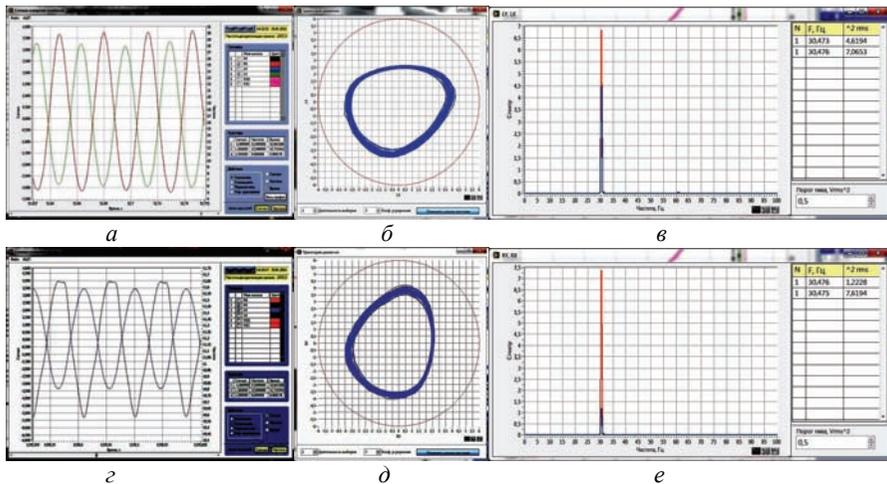


Рисунок 11 – Визуализация результатов измерений и обработки экспериментальных данных, полученных при частоте вращения ротора 32,5 Гц

На рис. 12 представлены трехмерные спектры радиальных перемещений центров опорных участков МППМ, полученные из двумерных с разверткой по частоте вращения, соответствующей каждому из фиксированных значений (см. рис. 6-11, в, е), и характеризующие динамические процессы на стационарных режимах (то есть при установившихся колебаниях, соответствующих заданным значениям частоты вращения в диапазоне 0-30 Гц). Они являются результатом анализа, выполненного с помощью модифицированного метода КВПФ [1], сигналов, описывающих виброперемещения (см. рис. 5).

Оценивая вибрационное состояние данной роторной системы на стационарных режимах по приведенным на рис. 12 проекциям на координатную плоскость «Частота вращения – Частота гармоник» трехмерным спектрам, являющимся одним из видов диаграммы Кэмбелла, можно прийти к выводам, что они подтверждают наличие кратных гармоник, которые возникают из-за нелинейности силовых характеристик магнитных подшипников. Отсутствие же пиков на постоянных частотах при изменении частоты вращения, которые наблюдались на частотно-временных диаграммах (рис. 4), указывает на по-мехоподобный или автоколебательный характер этих составляющих сигналов.

На рис. 13 приведены зависимости амплитуд радиальных виброперемещений от частоты возбуждения (вращения) соответственно основной первой гармоники  $A_1$ , супергармоник – второй  $A_2$  и третьей  $A_3$ , а также субгармоники  $A_{1/2}$ . В отличие от резонансной кривой (см. рис. 2), характеризующей зависимость первой гармоники от частоты возбуждения (то есть АЧХ), графики этих зависимостей получены интерполяцией данных кусочно-линейными сплайнами с автомасштабированием окон по амплитуде. На рис. 14 представ-

лены зависимости амплитуд осевых виброперемещений от частоты возбуждения (вращения) основной гармоники  $A_1$  и супергармоники  $A_2$ . Анализ этих результатов также подтверждает наличие в системе, наряду с гармоническими колебаниями с частотой возбуждения (вращения), суб- (см. рис. 13, б, в) и супергармонических (см. рис. 13, г) колебаний, а также кратных суб- и суперрезонансов, присущих системам с нелинейной восстанавливающей силой.

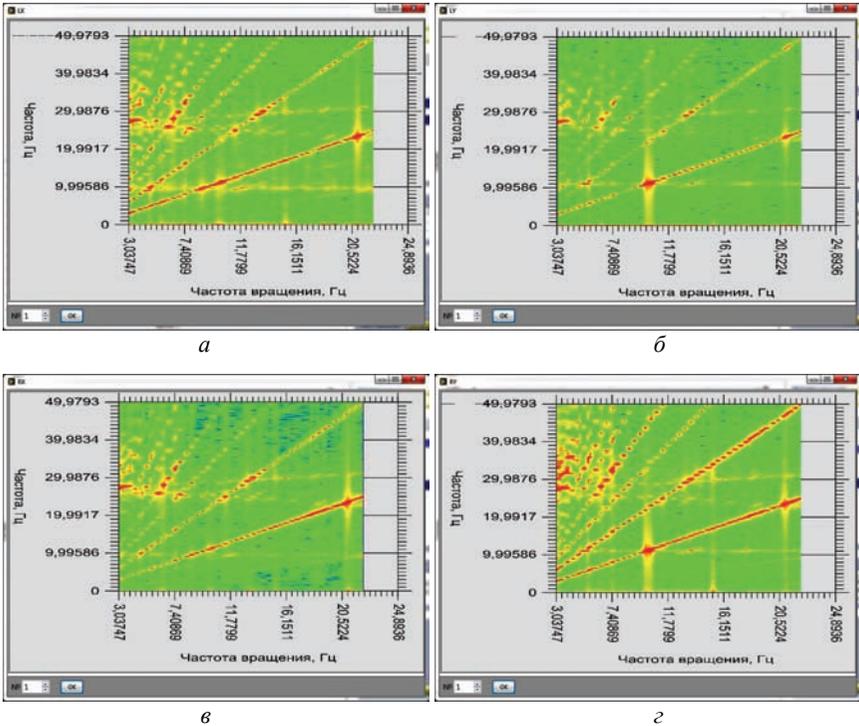


Рисунок 12 – Трехмерные спектры виброперемещений центров опорных участков (вид сверху): а – левого горизонтальных ( $x_1$ ), б – левого вертикальных ( $y_1$ ), в – правого горизонтальных ( $x_2$ ), г – правого вертикальных ( $y_2$ )

Кроме того, в результате совместного анализа результатов (рис. 13 и 14) выявлена связь между радиальными и осевыми колебаниями, хотя она и носит в данном случае слабовыраженный характер. Так, локальные пики на графике зависимости второй гармоники осевых перемещений от частоты (см. рис. 14, б) вблизи частоты вращения равной 11 Гц коррелируют с первым раздвоенным резонансным режимом, при котором ротор совершает движение типа прямой и обратной цилиндрических прецессий (см. рис. 2 и 13, а).

Оценивая всю совокупность результатов измерений на квазистатических режимах и их анализа различными методами, можно прийти к выводу, что

они дают полную картину динамического поведения модельного ротора в магнитных подшипниках в заданном диапазоне частот вращения и, например, могут служить основой для составления вибропаспорта роторной системы.

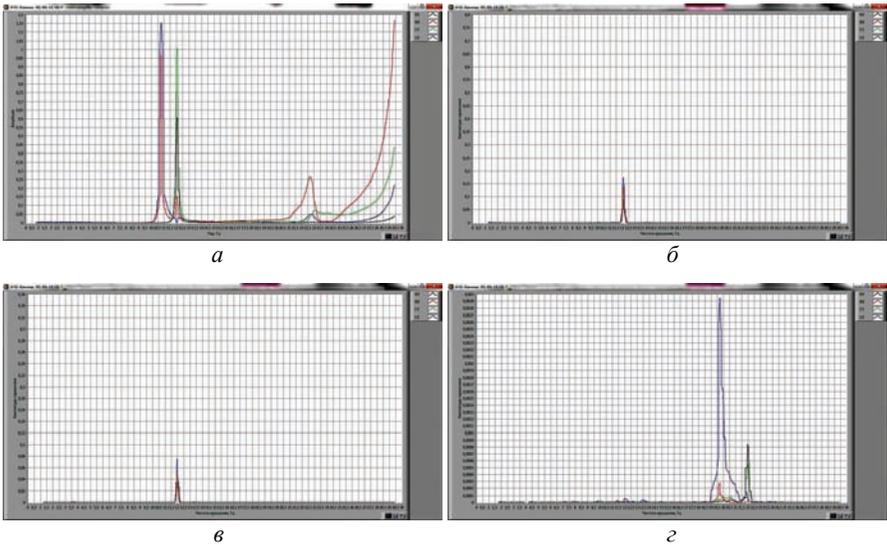


Рисунок 13 – Зависимость амплитуд различных гармоник радиальных перемещений опорных участков ротора от частоты возбуждения (вращения): *а* – основная гармоника  $A_1$ , *б* – супергармоника  $A_2$ , *в* – супергармоника  $A_3$ , *г* – субгармоника  $A_{1/2}$ ,

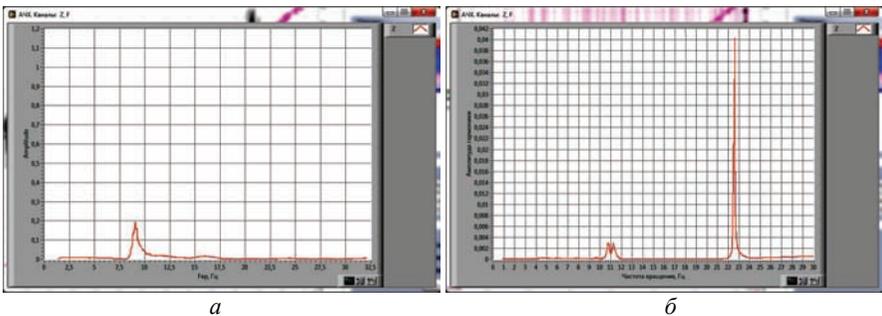


Рисунок 14 – Зависимость амплитуд различных гармоник осевых перемещений опорного участка ротора от частоты возбуждения (вращения): *а* – основная гармоника  $A_1$ , *б* – супергармоника  $A_2$

**Заключение.** В ходе выполнения экспериментальных исследований на лабораторной установке, реализующей полный магнитный подвес ротора, выявлено, что применение магнитных подшипников в качестве опор роторов

вносит особенности характерные нелинейным системам. Поэтому для адекватного моделирования динамики роторов в МП необходимо применение нелинеаризованных математических аналитических или численных моделей.

**Список литературы:** 1. *Мартыненко Г.Ю.* Программно-аппаратный комплекс для анализа виброперемещений роторов на магнитных подшипниках / *Г.Ю. Мартыненко, Ю.Н. Ульянов, А.Н. Пригорнев* // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2012. – Вып. 7 (105). – С. 109-116. 2. *Мартыненко Г.Ю.* Методика экспериментальных исследований динамики модельного ротора в комбинированном магнитном подвесе / *Г.Ю. Мартыненко* // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип. «Динаміка і міцність машин». – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 58. – С. 125-135. 3. *Мартыненко Г.* Ідентифікація математичної моделі жорсткого ротора в пасивно-активному магнітному підвісі на підставі експериментальних даних / *Г. Мартыненко* // *Машинознавство*. – Львів: Кінпатрі Лтд., 2009. – № 11 (149). – С. 9-14. 4. *Мартыненко Г.Ю.* Определение жесткостных характеристик радиальных магнитных подшипников на двух кольцевых постоянных магнитах / *Г.Ю. Мартыненко* // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип. «Динаміка і міцність машин». – Х.: НТУ «ХП», 2007. – № 38. – С. 83-95.

*Поступила в редколлегию 14.10.2013*

УДК 621.375

**Результаты экспериментальных исследований и анализ динамики модельного ротора в магнитных подшипниках разных типов / Г. Ю. Мартыненко** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 63 (1036). – С. 90-101. – Бібліогр.: 4 назв.

Описано експериментальні дослідження з вивчення динаміки модельного ротора в комбінованому пасивно-активному магнітному підвісі. Дослідження виконані з використанням спеціалізованого програмно-апаратного комплексу. Результати представлені у вигляді вібропереміщень центрів опорних ділянок ротора, їх траєкторій руху, спектрограм, а також амплітудно-частотних характеристик. На підставі аналізу експериментальних даних запропонована модифікована конструкція ротора, що дозволила знизити амплітуди коливань при значеннях швидкостей обертання близьких до критичних.

**Ключові слова:** динаміка ротора, магнітні підшипники, критичні швидкості.

The experimental investigations of the rotor dynamics of the model with the combined passive and active magnetic suspension are described. The studies are performed using specialized hardware and software. Results are presented as displacements of rotor bearings centers, their trajectories, spectrograms and amplitude-frequency characteristics. Based on the analysis of experimental data the rotor modified construction is offered. It is possible to reduce oscillation amplitude values when rotational speeds are near-critical.

**Keywords:** rotor dynamics, magnetic bearings, critical speed.