

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

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ МОДЕЛЬНОГО РОТОРА В КОМБИНИРОВАННОМ МАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ

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 амплитудно-частотных характеристик. На основании анализа экспериментальных данных предложена модифицированная конструкция ротора, позволявшая снизить амплитуды колебаний при значениях скоростей вращения близких к критическим.

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

Введение. Использование магнитных подшипников для опирания вращающихся роторов в современном приборостроении, энергетическом и транспортном машиностроении, которое в настоящее время находит все большее применение, нуждается в развитии экспериментальных методов исследования динамического поведения таких систем. Это необходимо для обоснования достоверности расчетных результатов и подтверждения корректности применяемых на практике технических решений. Малое трение в магнитном подвесе позволяет реализовывать в таких роторных машинах, например, как детандеры, ультрацентрифуги и турбокомпрессоры, скорости вращения роторов, ограничиваемые только прочностью материалов. Особой экономичностью, эффективностью и малой стоимостью отличаются комбинированные магнитные подвесы, в которых совместно с управляемыми активными магнитными подшипниками (АМП) используются подшипники на постоянных магнитах (МППМ) [1].

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 [2]. 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 связи с этим работы по экспериментальному изучению и оценке динамического поведения роторов на магнитных подшипниках, позволяющие

выявить специфические особенности их поведения, а также присущие только таким системам явления являются актуальными.

1 Объект и цели исследований. Целью данной работы является экспериментальное изучение динамического поведения вращающегося ротора в магнитных подшипниках различных типов и выявление особенностей, вносимых в роторные системы магнитными подшипниками. Для достижения поставленных целей была использована лабораторная установка, представленная на рис. 1 [2]. В ней реализован комбинированный магнитный подвес ротора, который состоит 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.

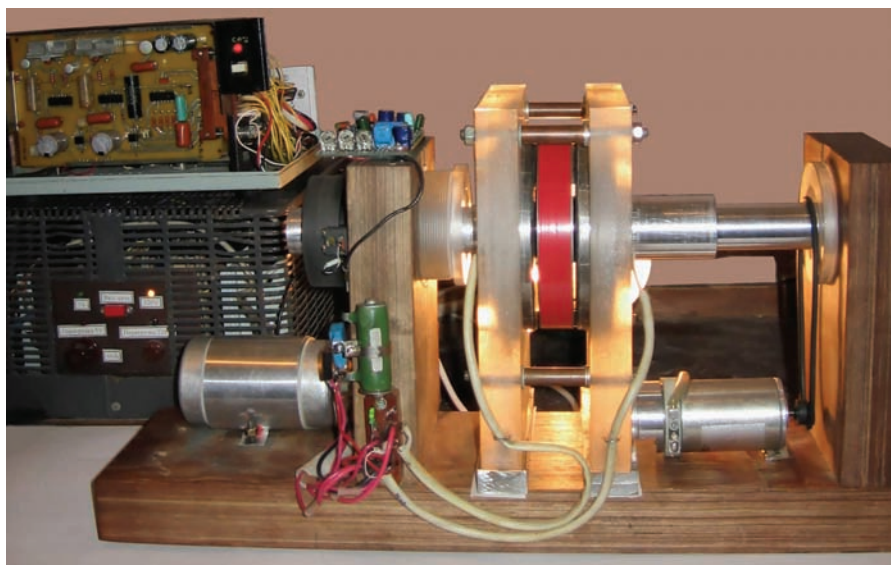


Рисунок 1 – Лабораторная установка ротора в комбинированном магнитном подвесе

2 Системы управления АМП, регистрации, обработки и анализа экспериментальных данных. В осевом направлении устойчивость ротора лабораторной установки обеспечивает АМП, а изменение управляющих напряжений, подаваемых на обмотки, производится системой управления в зависимости от положения ротора, как показано на рис. 2 [2]. При этом токи создают необходимое для стабилизации значение магнитной силы. Лабораторная установка оснащена аналоговыми магнитными сенсорами на эффекте Холла для контроля положения ротора и дискретным датчиком Холла для измерения его частоты вращения. Разгон ротора осуществлялся электродвигателем с изменением частоты вращения в диапазоне от 0 до 3000 об/мин.

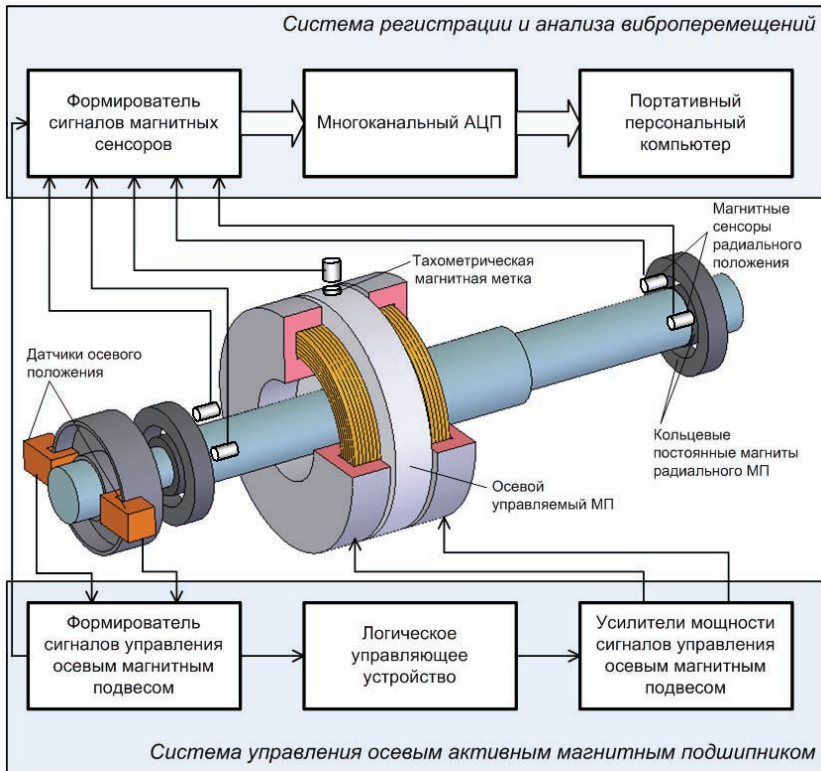


Рисунок 2 – Структурная схема системы регистрации и анализа виброперемещений ротора лабораторной установки [2]

Для сбора и обработки данных был использован разработанный программно-аппаратный измерительный комплекс [2], 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.

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 на диске осевого АМП).

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 [2].

3. Параметры лабораторной установки, постановка и проведение экспериментальных исследований. Первоначальные исследования проводились на лабораторной установке, изображенной на рис. 1, полная геометрическая модель которой приведена на рис. 3.

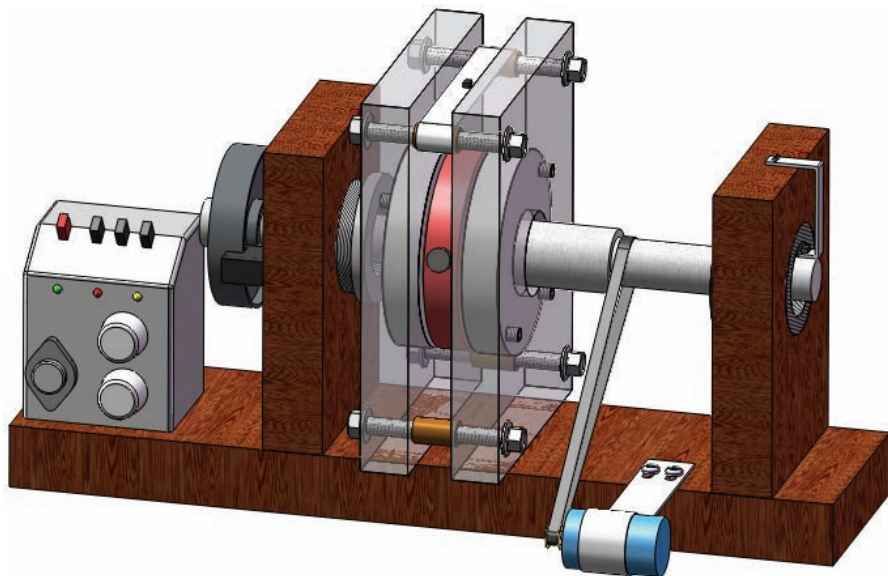


Рисунок 3 – Полная геометрическая модель лабораторной установки ротора в МП

Данная лабораторная модель включает основание с четырьмя стойками для крепления неподвижных колец радиальных МППМ и статоров осевого АМП, а также сам ротор из дюралюминия, на котором размещены диск осевого АМП из ферромагнитного материала, кольцевые постоянные магниты радиальных МППМ и диск системы регистрации (измерения). На основании размещен блок управления осевым АМП и электродвигатель, а на стойках радиальных МППМ – оптические датчики системы измерения положения ротора. 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 статоров.

Геометрическая модель ротора, находящегося в магнитных подшипниках, с указанием местоположения светодатчиков осевого положения, приведена на рис. 4.

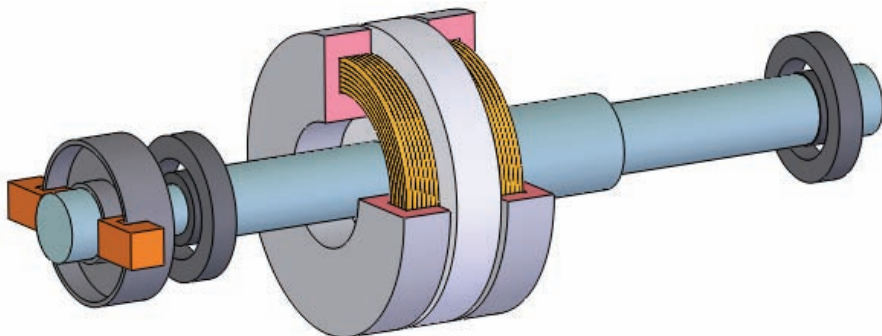


Рисунок 4 – Модель ротора в радиальных МППМ и осевом АМП со светодатчиками осевого положения

Подробное описание проведенных на этой модели экспериментальных исследований, выполненных для идентификации математической модели жесткого ротора, приведено в [4]. Следует отметить, что первоначальные измерения проводились только одним датчиком, регистрирующим вертикальные отклонения центра правого опорного участка (см. рис. 3) с использованием универсальной платы сбора аналоговой и ввода/вывода цифровой информации АЦП ЛА-1.5РСИ, установленной в ПЭВМ [4]. При проведении экспериментов осциллограммы движения правой опорной участка ротора в вертикальном направлении фиксировались дискретно для выбранных значений скорости вращения ротора в диапазоне от 0 до 3000 об/мин. При проведении экспериментов было выявлено, что прохождение третьего резонансного режима отличалось неустойчивостью, амплитуды колебаний достигали величины зазоров, и дальнейший разгон ротора был возможен только при внесении дополнительного механического демпфирования в диапазоне ~1750-1950 об/мин (~29-32,5 Гц). Амплитудно-частотная характеристика, полученная путем построения зависимости амплитуды первой (основной) гармоники радиального виброперемещения центра правого опорного участка (y_2) от частоты вращения, представлена на рис. 5.

Такая же неустойчивость движения была обнаружена и при проведении второй серии экспериментальных исследований на этой лабораторной модели, в которых уже использовалась аппаратура и программное обеспечение, описанное в п. 2. Здесь контролировались все пять степеней свободы ротора в МП – горизонтальные и вертикальные смещения центров радиальных опорных участков (левого x_1 , y_1 и правого x_2 , y_2) и осевое смещение. Амплитудно-частотная характеристика системы представлена на рис. 6. На ней область неустойчивых движе-

ний в диапазоне ~1850-2280 об/мин (~31-38 Гц), в которой амплитуды колебаний без внесения дополнительного механического демпфирования превышали радиальный зазор МППМ, отмечена штриховыми линиями.

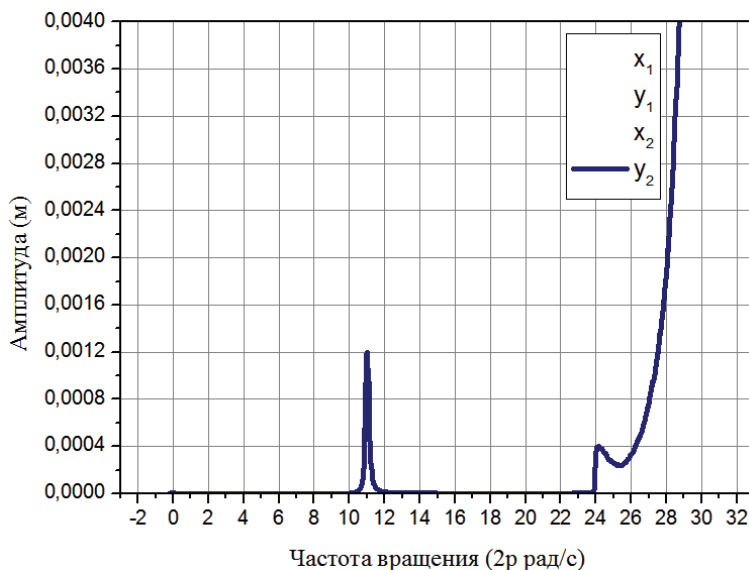


Рисунок 5 – Амплитудно-частотная характеристика ротора лабораторной установки с комбинированным магнитным подвесом (первый эксперимент)

Таким образом, был сделан вывод, что изменением параметров управления осевым активным магнитным подшипником, невозможно достичь снижения амплитуд колебаний в резонансном режиме, когда ротор совершает движение типа прямой конической прецессии. Статическое уравнивание с помощью балансира, в качестве которого использовалась магнитная метка, также не дало результата, так как при таких колебаниях основной вклад в дестабилизирующие силы вносит моментная неуровновешенность.

Кроме того, в ходе проведения экспериментов было установлено, что моментная неуровновешенность может возникать и от взаимодействия магнитных полей, создаваемых магнитной меткой, расположенной на диске АМП (см. рис. 3), и переменных магнитных полей, создаваемых электромагнитами этого АМП. Причем обнаружено, что в этом случае большее влияние оказывает не величина намагниченности, а взаимная полярность магнитов, зависящая от стороны магнитной метки, которой она крепится к диску. Кроме того, изменение электромагнитных полей в процессе работы системы управления делает эту электромагнитную неуровновешенность переменной, что приводит к возникновению дестабилизирующих усилий, частота изменения которых совпадает с частотой вращения.

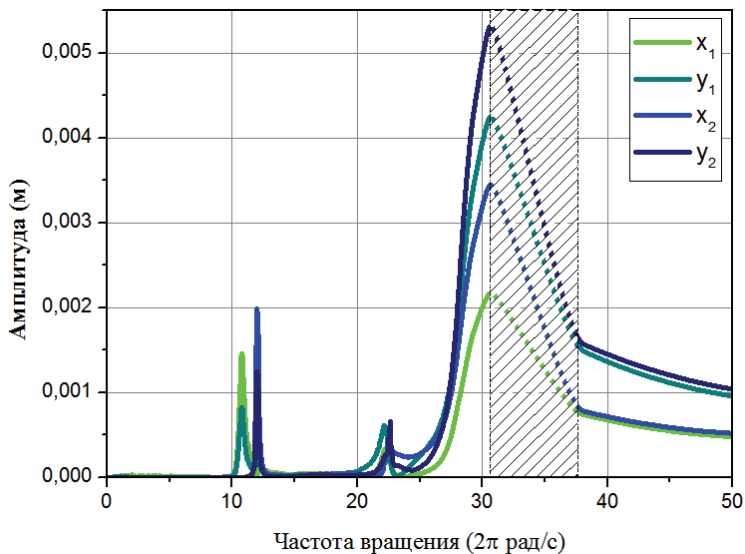


Рисунок 6 – Амплитудно-частотная характеристика ротора лабораторной установки с комбинированным магнитным подвесом (второй эксперимент)

Было также определено, что еще одной причиной неустойчивости движения является значительное удаление точки измерения осевого отклонения и точки стабилизации (расположения электромагнитов осевого АМП).

Учитывая вышесказанное, было принято решение модифицировать лабораторную установку. При этом были внесены следующие изменения: перенесена точка измерения осевых смещений ротора за счет расположения светодатчиков в непосредственной близости от точки управления (электромагнитов осевого АМП), укорочен ротор, а вместо пластмассового диска системы измерений применен диск, изготовленный из латуни.

Такой подход кроме устранения указанных недостатков позволил еще и приблизить центр масс ротора к среднему положению между радиальными МППМ, что также положительно сказывается на устойчивости движения ротора вследствие обеспечения горизонтальности его оси в положении статического равновесия.

Полная геометрическая модель модифицированной лабораторной установки и модель ротора с навесными элементами в магнитных подшипниках, приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

Амплитудно-частотная характеристика, полученная при проведении экспериментальных исследований для этой модели лабораторной установки, представлена на рис. 9. Следует отметить, что такой подход позволил снизить амплитуды колебаний ротора в резонансных областях (отмечены штриховыми линиями) до величин, не превышающих радиальные зазоры МППМ,

что дало возможность выполнить разгон и остановку ротора без внесения дополнительного механического демпфирования.

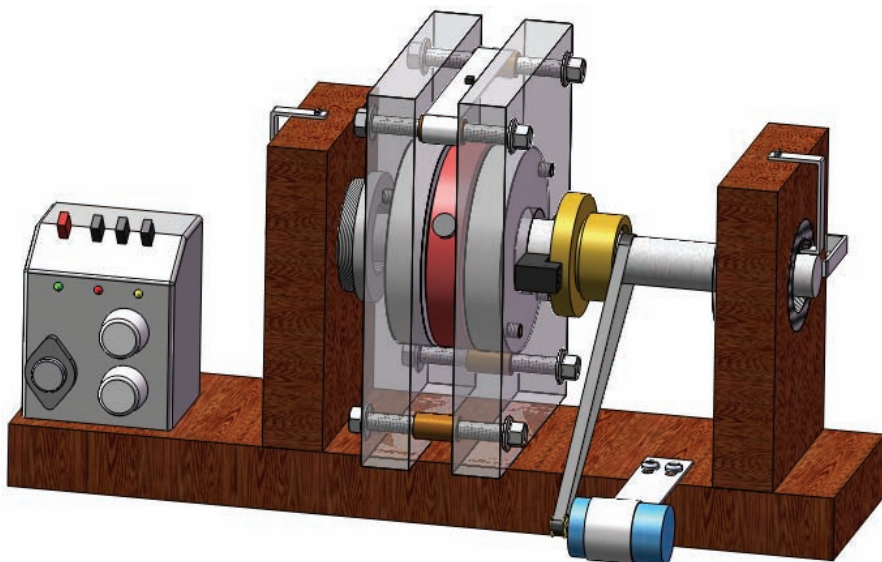


Рисунок 7 – Геометрическая модель модифицированной лабораторной установки

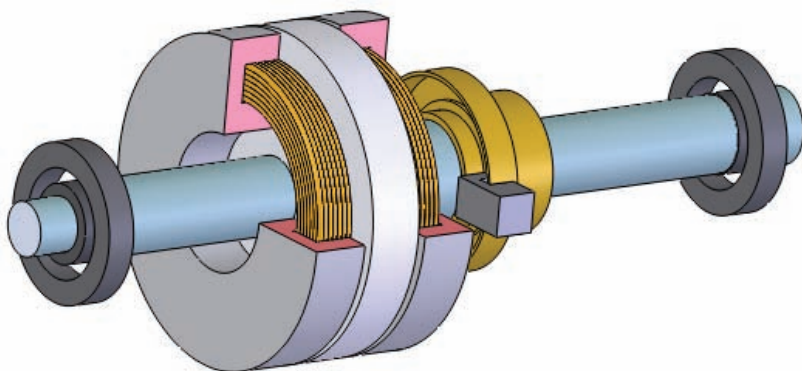


Рисунок 8 – Модель модифицированного ротора в радиальных МППМ и осевом АМП со светодатчиками осевого положения

Таким образом показано, что дальнейшее проведение экспериментальных исследований с целью выявления особенностей динамического поведения роторов в МП могут проводиться путем сбора и обработки данных, построения осциллограмм сигналов, их спектрограмм, траекторий движения отдельных точек и АЧХ с использованием именно этой модели.

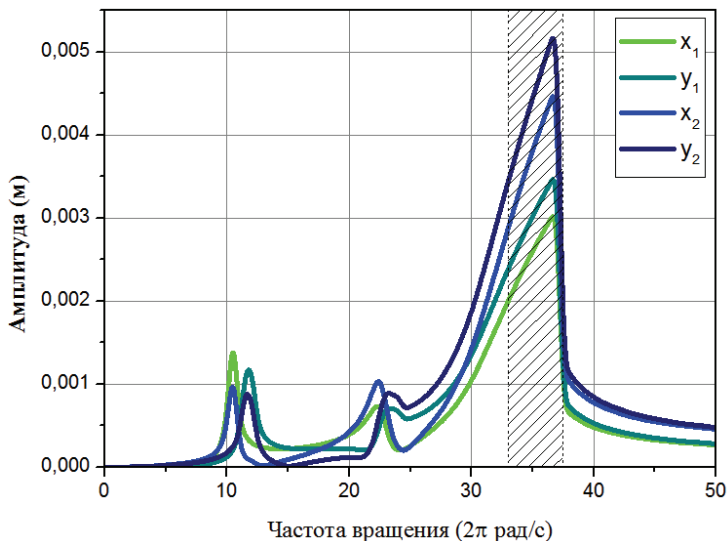


Рисунок 9 – Амплитудно-частотная характеристика ротора модифицированной лабораторной установки с комбинированным магнитным подвесом

Для обеспечения возможности идентификации математических моделей (путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных) в процессе проведения исследований по измеренным геометрическим параметрам роторов обеих конструкций, представленных на рис. 10, выполнено расчетное определение геометрических и физических параметров лабораторных установок, результаты которых сведены в таблицу.

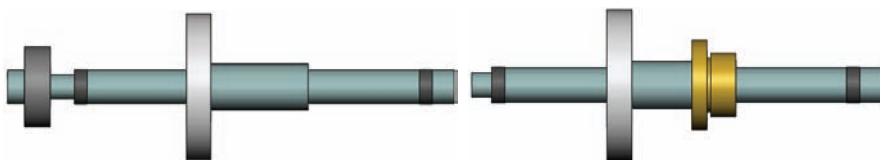


Рисунок 10 – Модели роторов с навесными элементами (для расчета геометрических и физических параметров)

При этом для магнитных сил принята нелинейная аппроксимация экспериментальных и расчетных данных, выполненная методом наименьших квадратов кубическими полиномами вида [5]:

$$\begin{aligned}
 F_{M\rho}(\rho) &= k_{\rho 2}\rho^3 + k_{\rho 1}\rho^2 + k_{\rho 0}\rho + f_{\rho 0}; \\
 F_{Mz}(z) &= k_{z 4}z^5 + k_{z 3}z^4 + k_{z 2}z^3 + k_{z 1}z^2 + k_{z 0}z + f_{z 0}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Таблица – Параметры лабораторных установок ротора в МП

Параметр	Значение параметра	
	модель 1	модель 2
<i>Физические параметры</i>		
Масса ротора m , [кг]	2,496	2,690
Экваториальный момент инерции J_1 , [кг·м ²]	0,0107386	0,0099722
Полярный момент инерции J_3 , [кг·м ²]	0,0033177	0,0034713
<i>Геометрические параметры</i>		
Расстояние от левого МППМ до ц.т. l_1 , [м]	0,107	0,118
Расстояние от правого МППМ до ц.т. l_2 , [м]	0,177	0,166
Линейный эксцентриситет e_2 , [м]	0,00006	0,00006
Угловой эксцентриситет γ_1 , [рад]	0,003	0,003
<i>Параметры магнитных подшипников</i>		
Зазор в радиальном МППМ δ_{rv} , [м]	0,0055	0,0055
Зазор в осевом АМП δ_{zs} , [м]	0,003	0,003
Коэффициент магнитной силы k_{p2} [Н/м ³]	$-0,11488 \times 10^9$	$-0,11488 \times 10^9$
Коэффициент магнитной силы k_{p1} [Н/м ²]	$-0,13321 \times 10^{-3}$	$-0,13321 \times 10^{-3}$
Коэффициент магнитной силы k_{p0} [Н/м]	$-0,59298 \times 10^4$	$-0,59298 \times 10^4$
Магнитная сила при $\rho = 0$ f_{p0} [Н]	0	0
Коэффициент магнитной силы k_{z5} [Н/м ⁵]	$-0,1728 \times 10^{15}$	$-0,1728 \times 10^{15}$
Коэффициент магнитной силы k_{z4} [Н/м ⁴]	$0,67752 \times 10^3$	$0,67752 \times 10^3$
Коэффициент магнитной силы k_{z3} [Н/м ³]	$0,48766 \times 10^9$	$0,48766 \times 10^9$
Коэффициент магнитной силы k_{z2} [Н/м ²]	$-0,52963 \times 10^{-2}$	$-0,52963 \times 10^{-2}$
Коэффициент магнитной силы k_{z1} [Н/м]	$-0,83604 \times 10^4$	$-0,83604 \times 10^4$
Магнитная сила при $z = 0$ f_{z0} [Н]	0	0

Корректность расчетных параметров лабораторной установки, необходимых для аналитических математических моделей, описанных, например, в [6], подтверждена сопоставлением со значениями, полученными в результате замеров. Так, например, массы роторов исходной и модифицированной конструкций, найденные в результате взвешивания, равны 2,5 и 2,7 кг соответственно, а расстояния от центра масс до центров левого и правого опорных участков 110 мм и 180 мм для исходной конструкции и 120 мм и 170 мм для модифицированной.

Таким образом, расхождение результатов не превышает 0,5%, что позволяет сделать вывод о возможности использования полученных параметров в математических моделях без внесения существенных погрешностей в результаты расчетов, связанных с некорректным заданием исходных данных.

Заключение. В ходе проведения предварительных экспериментальных исследований на лабораторной установке, реализующей комбинированный пассивно-активный магнитный подвес ротора было обнаружено, что причинами неустойчивости движения вращающегося ротора могут быть как конструкционные несовершенства (недопустимая величина статической и моментной неуравновешенностей, отдаленность точки измерения и управления осе-

вого АМП), так и специфичные факторы, свойственные только таким системам, например, электромагнитная неуравновешенность, связанная с неоднородностью в окружном направлении магнитного поля, создаваемого осевым АМП. Для устранения перечисленных недостатков конструкция лабораторной установки была модифицирована с целью дальнейшего проведения экспериментальных исследований по выявлению особенностей роторной динамики, связанных с применением магнитных подшипников.

Список литературы: 1. *Мартыненко Г.Ю.* Магнитные подшипники как упруго-демпферные опоры роторов с управляемой жесткостью / *Г.Ю. Мартыненко* // Вісник НТУ «ХП», 2008. – № 47. – С. 111-124. 2. *Мартыненко Г.Ю.* Программно-аппаратный комплекс для анализа виброперемещений роторов на магнитных подшипниках / *Г.Ю. Мартыненко, Ю.Н. Ульянов, А.Н. Пригорнев* // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 7 (105). – С. 109-116. 4. *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. 5. *Мартыненко Г.Ю.* Определение жесткостных характеристик радиальных магнитных подшипников на двух кольцевых постоянных магнитах / *Г.Ю. Мартыненко* // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», 2007. – № 38. – С. 83-95. 6. *Мартыненко Г.Ю.* Общий подход к моделированию нелинейной динамики жестких роторов в магнитных подшипниках различных типов / *Г.Ю. Мартыненко* // Доповіді Національної академії наук України. – К.: Доповіді НАН України, 2012. – № 3. – С. 78–84.

Поступила в редколлегию 14.10.2013

УДК 621.375

Методика экспериментальных исследований динамики модельного ротора в комбинированном магнитном подвесе / Г. Ю. Мартыненко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 58 (1031). – С. 99-99. – Бібліогр.: 6 назв.

Описано експериментальні дослідження з вивчення динаміки модельного ротора в комбінованому пасивно-активному магнітному підвісі. Дослідження виконано з використанням спеціалізованого програмно-апаратного комплексу. Результати представлено у вигляді 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 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.