

УДК 534.01

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННОЙ СИЛЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА РОТОРА

© 2010 г. В.В. Знышев, Е.В. Кирюшина, С.Ю. Литвинчук, М.Я. Николаев,
В.Ф. Овчинников

НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

znyshev@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 16.08.2010

Представлен алгоритм, расширяющий возможности управления динамикой ротора на электромагнитном подвесе за счет формирования заданной зависимости сил электромагнитных подшипников от перемещений ротора.

Ключевые слова: алгоритм, ротор, сила, управление, электромагнитный подшипник.

Динамика ротора на электромагнитных подшипниках (ЭМП) существенно зависит от характеристик системы управления (СУ) электромагнитными силами ЭМП. Возможны два способа формирования силы ЭМП [1]:

– с помощью управления напряжением на обмотках магнитов ЭМП;

– с помощью управления током в обмотках.

Более рациональным представляется управление непосредственно изменением сил магнитов ЭМП.

Формально задача управления силой ЭМП сводится к определению тока i в магнитах, при котором создаваемая магнитами ЭМП сила F подчиняется заданному закону. Сила F зависит от тока в магнитах и перемещений ротора y в местах расположения ЭМП:

$$F = \Phi(i, y). \quad (1)$$

Конкретная функция $\Phi(i, y)$ определяется конструкцией магнитов и ротора и может быть получена расчетным путем или экспериментально. Зная (1), можно выразить ток как функцию перемещений ротора и силы ЭМП:

$$i = \Psi(y, F). \quad (2)$$

При измеренных перемещениях y формирование тока в обмотках ЭМП в соответствии с (2) приведет к созданию магнитами ЭМП заданных сил.

Рассмотрим алгоритм формирования тока управления для известной зависимости сил магнитов ЭМП от тока в обмотках магнитов и перемещений ротора [1]:

$$F = \begin{cases} C \frac{(I_0 - i)^2}{(S_0 - y)^2}, & i \leq -I_0, \\ C \left[\frac{(I_0 - i)^2}{(S_0 - y)^2} - \frac{(I_0 + i)^2}{(S_0 + y)^2} \right], & -I_0 < i < I_0, \\ -C \frac{(I_0 + i)^2}{(S_0 + y)^2}, & i \geq I_0, \end{cases} \quad (3)$$

$$C = \frac{L_0 S_0}{2}.$$

Здесь L_0 – индуктивность обмотки магнита, S_0 – номинальный зазор между ротором и магнитами ЭМП, I_0 – заданный постоянный ток в обмотке.

Из (3) получается зависимость тока управления от перемещений ротора и силы ЭМП (2):

$$i = \begin{cases} -I_0 + (S_0 + y) \sqrt{-\frac{F}{C}}, & F \leq -\frac{4CI_0^2}{(S_0 + y)^2}, \\ \frac{1}{2S_0 y} \left[I_0(S_0^2 + y^2) - (S_0^2 - y^2) \sqrt{I_0^2 + yS_0 \frac{F}{C}} \right], & -\frac{4CI_0^2}{(S_0 + y)^2} < F \leq \frac{4CI_0^2}{(S_0 - y)^2}, \\ I_0 - (S_0 - y) \sqrt{\frac{F}{C}}, & F \geq \frac{4CI_0^2}{(S_0 - y)^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Вторая строка в этом выражении соответствует случаю $y \neq 0$. Если $y \approx 0$, то из (3)

$$i = -\frac{S_0^2 F}{4CI_0}.$$

Используя соотношения (4), можно задавать желаемый закон изменения электромагнитной силы F от перемещения.

Зависимость, близкая к (4), использована в [2] при исследовании устойчивости жесткого ротора на двух радиальных ЭМП при нулевом I_0 с помощью простейшей модели, описывающей движение центра масс и угловые движения ротора. Однако использованные в исследуемой упрощенной модели связи для токов в магнитах разных ЭМП не могут адекватно заменить связи в более общей исходной модели из-за сильной нелинейной зависимости сил ЭМП от токов в обмотках магнитов. Использование соотношений (4) решает проблему упрощения исходных уравнений [2].

Принципиальная возможность применения предложенного алгоритма формирования токов управления в СУ ЭМП показывается на примере упрощенной модели ротора на ЭМП (рис. 1). Модель включает в себя связанные пружиной с линейной жесткостью K две массы, которые могут двигаться в вертикальном направлении. Движение массы m_2 относительно массы m_1 моделирует упругие колебания гибкого ротора.

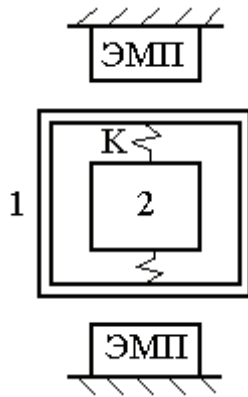


Рис. 1. Упрощенная модель ротора на ЭМП

Уравнения динамики упрощенной модели:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y} + m_2 (\ddot{y} + \ddot{y}_2) &= F + f(t), \\ m_2 (\ddot{y} + \ddot{y}_2) + 2hm_2 \dot{y}_2 + Ky_2 &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где y – перемещения массы m_1 ; y_2 – относительные перемещения массы m_2 (в системе координат, связанной с массой m_1), $m = m_1 + m_2$ – общая масса модели. Второе слагаемое во втором уравнении системы (5) моделирует рассеяние энергии при деформациях ротора, h – коэффициент потерь. Функция $f(t)$ моделирует внешнюю силу, вызванную дисбалансом, действующую на ротор при его вращении. Задавая внешнюю силу как гармоническую с переменной

угловой частотой ω , можно смоделировать разгон или торможение ротора в зависимости от знака углового ускорения ε :

$$f(t) = m\omega^2 \sin \varphi(t),$$

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t, \quad \varphi = \omega_0 t + \varepsilon t^2 / 2.$$

Основные идентификаторы модели задавались близкими к параметрам системы с одним из реальных роторов:

$$\begin{aligned} m &= 8 \text{ кг}, m_2 = 2.4 \text{ кг}, K = 38 \text{ Н/мм}, h = 3.77 \text{ с}^{-1}, \\ S_0 &= 0.00045 \text{ м}, L_0 = 0.054 \text{ Гн}, I_0 = 0, \\ d &= 0.000015 \text{ м}, \omega_0 = 0, \\ \varepsilon &= 3 \text{ с}^{-2}, \tau \approx 0.0018 \text{ с}. \end{aligned}$$

F моделирует силу, действующую со стороны ЭМП на ротор. Использование предложенного алгоритма иллюстрируется результатами четырех вариантов расчетов, различающихся алгоритмами вычисления этой силы.

Вариант 1. Расчет силы по исходному нелинейному алгоритму (3) с помощью компьютерной модели ДИРОМ [3], в которой учтены основные характеристики СУ ЭМП, существенно влияющие на динамику гибкого ротора, время на измерение и обработку сигнала о перемещениях ротора (время «запаздывания» – τ) и ограничение тока в обмотках ЭМП. Ток управления задается линейной функцией перемещения и скорости перемещения – пропорционально-дифференциальное управление по току.

Вариант 2. Расчет силы по модели ДИРОМ, но ток управления уже формируется по новому алгоритму (4) таким образом, чтобы ЭМП работал как линейная упруго-вязкая опора, то есть желаемый закон формирования силы:

$$F_\phi = -ay - b\dot{y}.$$

Вариант 3. Расчет силы как реакции упруго-вязкой опоры: $F = F_\phi$.

Вариант 4. Расчет силы как реакции линейной упруго-вязкой опоры с запаздыванием:

$$F = -ay(t - \tau) - b\dot{y}(t - \tau).$$

Результаты расчетов представлены в виде зависимостей от частоты $\nu = \omega/2\pi$ изменения внешней силы $f(t)$ перемещений массы 1 (рис. 2–4) и сил реакции опоры (рис. 5).

Зависимость на рис. 2 (вариант 1) имеет вид, стандартный для нелинейных систем с жесткой характеристикой возбуждения колебаний. Использование новой системы управления (вариант 2) позволяет в корне изменить вид этой зависимости, сделав ее близкой к линейной. Результаты расчетов по варианту 2 при $a = 70000 \text{ Н/м}$ и $b = 200 \text{ Н·с/м}$ представлены на рис. 3–5 красным цветом.

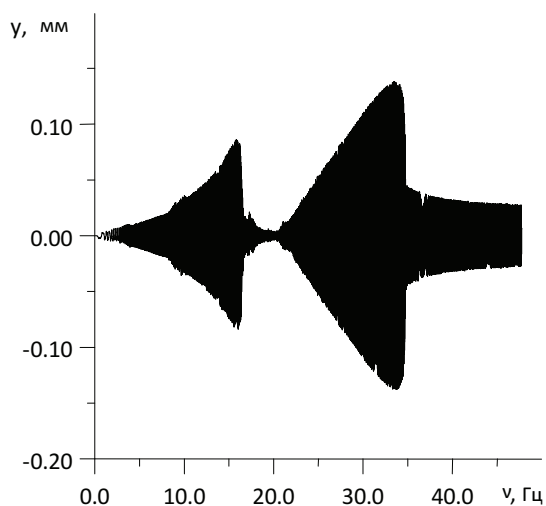
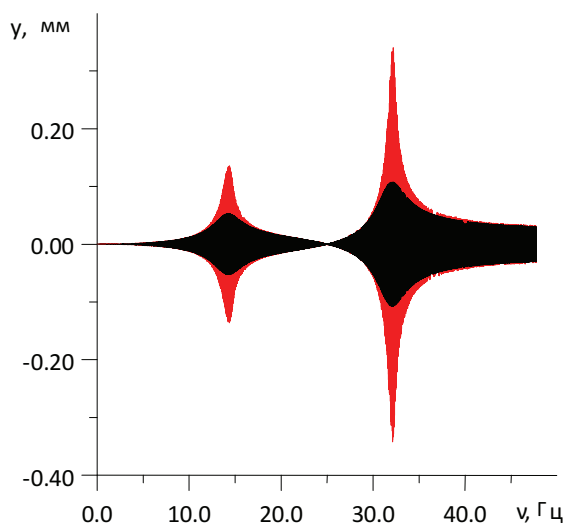
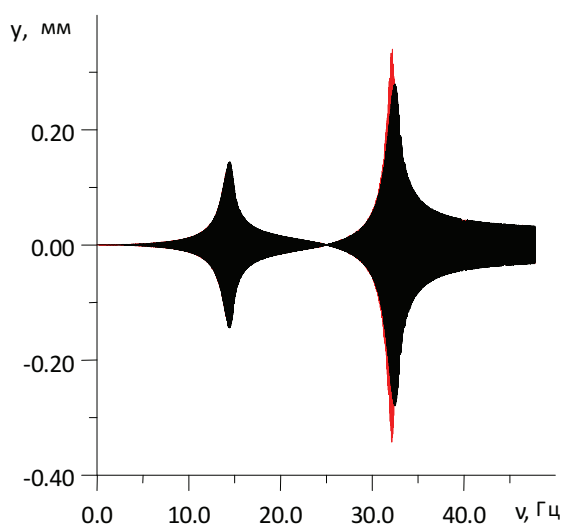
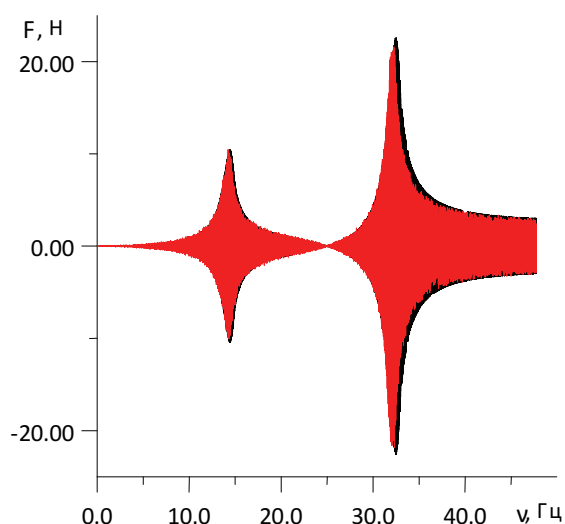


Рис. 2. Перемещения массы 1. Вариант 1

Рис. 3. Перемещения массы 1.
Красный цвет – вариант 2. Чёрный цвет – вариант 3Рис. 4. Перемещения массы 1.
Красный цвет – вариант 2. Черный цвет – вариант 4Рис. 5. Сила реакции опоры.
Красный цвет – вариант 2. Черный цвет – вариант 4

Анализ причин разницы максимальных (резонансных) амплитуд колебаний для вариантов 2 и 3 (рис. 3) показал, что относительный рост резонансной амплитуды для варианта 2 обусловлен запаздыванием сигнала в исходной СУ ЭМП. В связи с этим дополнительно к варианту 3 был рассмотрен вариант 4. Перемещения y массы 1 для варианта 4 представлены черным цветом на рис. 4. Силы реакции опоры F по вариантам 2 и 4 представлены черным и красным цветом соответственно на рис. 5.

Из рис. 4 и 5 следует, что амплитуды колебаний для первого резонансного пика практически совпадают, а для второго пика амплитуда при резонансе в случае варианта 2 с «линейной» силой ЭМП $A = 0.34$ мм, сила $F = 21.7$ Н, для варианта 4 $A = 0.28$ мм, сила $F = 22.6$ Н. Причиной этих небольших отличий является ограничение тока в обмотках магнитов ЭМП,

учитываемое в компьютерной модели ДИРОМ, и, как следствие, ограничение силы ЭМП, которого нет при расчетах по варианту 4.

Тестовые примеры показали принципиальную возможность формировать в СУ желаемый закон изменения силы ЭМП от перемещений и скоростей движения ротора. При построении СУ следует иметь в виду, что заданная сила будет формироваться с некоторым запаздыванием из-за инерционности системы управления.

Предполагается, что применение представленного алгоритма в СУ ЭМП позволит:

- формировать для управления динамикой ротора различные желаемые законы изменения сил ЭМП;
- строить централизованные робастные системы управления электромагнитным подвесом ротора на основе линейных матричных неравенств [4];

– упростить процедуру идентификации характеристик ротора на ЭМП, в частности, определения дисбаланса ротора в условиях эксплуатации [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 08-01-97034-р, 10-08-00882_а).

Список литературы

1. Schweitzer G., Bleuler H., Traxler A. // Active magnetic bearings. Basics, Properties and Applications. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zurich. 1994. 244 p.
2. Yuichi Ariga, Renzo Nonami, Ratsunori Sakai. Nonlinear control of zero power magnetic bearing using

Lapunov's direct method // 7 International Symposium on Magnetic Bearings, August 23-25. ETH Zurich. 2000. P. 293–298.

3. Знышев В.В., Кодочигов Н.Г., Кирюшина Е.В. и др. Моделирование динамики вертикального неоднородного гибкого ротора на электромагнитном подвесе // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Механика. Вып. 1(7). 2006. С. 14–20.

4. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М.: Физматлит, 2007. 280 с.

5. Митенков Ф.М., Знышев В.В., Кирюшина Е.В. и др. Алгоритм определения дисбаланса ротора на электромагнитных опорах // Проблемы машиностроения и надежности машин. М.: Наука, 2007. № 4. С. 9–14.

**ALGORITHM FOR GENERATING A PREASSIGNED FORCE
OF THE ACTIVE MAGNETIC BEARINGS IN THE CONTROL SYSTEM
OF A ROTOR ELECTROMAGNETIC SUSPENSION**

V.V. Znyshev, E.V. Kiryushina, S.Yu. Litvinchuk, M.Ya. Nikolayev, V.F. Ovchinnikov

An algorithm has been presented that broadens the potential to control electromagnetically suspended rotor dynamics due to the generation of a specified dependence of electromagnetic bearing forces as a function of the rotor motion.

Keywords: algorithm, rotor, force, controlling, electromagnetic bearing.