

Маврин Владислав Алексеевич, магистрант,
Самарский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАДИАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ СО СМЕЩЕННЫМ ЦЕНТРОМ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

Аннотация. В статье разработана расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником со смещенным центром магнитной системы относительно оси вращения ротора и независимым регулированием токов противоположных магнитов. По известной методике рассчитаны параметры регуляторов системы для опытного образца турбоагрегата с электромагнитными подшипниками. Приведены результаты компьютерного моделирования.

Ключевые слова: Электромагнитный подшипник, независимое регулирование токов, параметры регуляторов.

1. Система управления электромагнитным подшипником

Современные системы управления электромагнитными подшипниками являются цифровыми. Однако при синтезе цифровых регуляторов чаще всего применяется метод непрерывного прототипа. Согласно этому подходу, сначала разрабатывается непрерывная система управления, обладающая необходимыми динамическими характеристиками, а затем она преобразуется в цифровую версию.

Рассмотрим непрерывный прототип системы управления радиальными электромагнитными подшипниками агрегата с горизонтальным положением ротора и независимым регулированием токов противоположных магнитов (рисунок 1) [1].

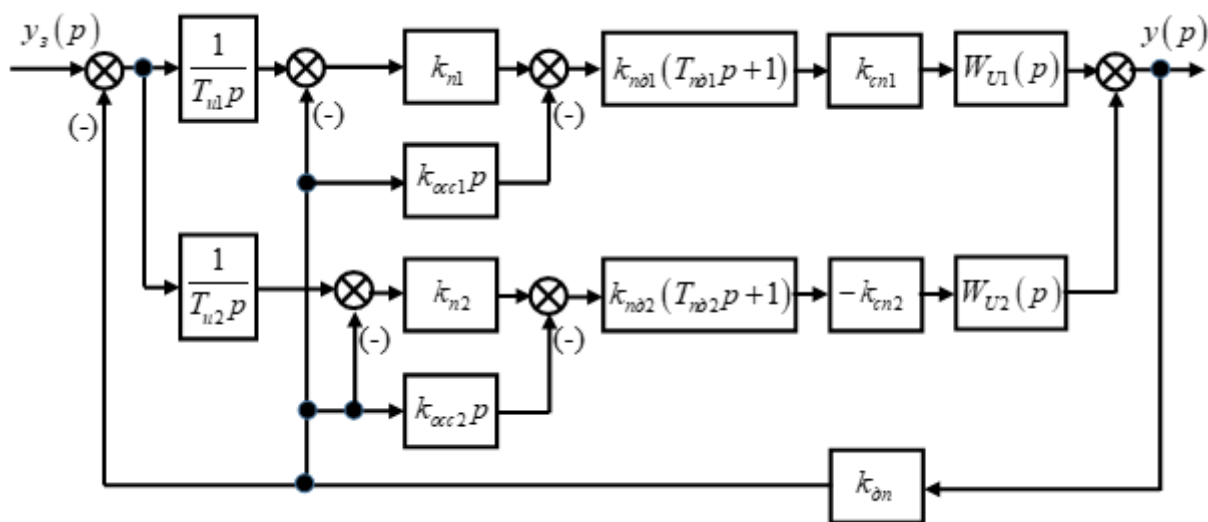


Рисунок 1. Структурная схема непрерывного прототипа системы управления радиальными электромагнитными подшипниками агрегата с горизонтальным положением ротора и независимым регулированием токов противоположных магнитов

Такая система управления позволяет регулировать токи противоположных электромагнитов при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора. При этом смещение центра магнитной системы позволяет скомпенсировать силу веса



ротора при равных токах противоположных магнитов за счет перераспределения воздушных зазоров, что приводит к снижению потребления электрической энергии.

На структурной схеме приняты следующие обозначения: T_{u1} и T_{u2} – постоянные времени интегральных регуляторов; k_{n1} и k_{n2} – коэффициенты передачи П-регуляторов; k_{nd1} , T_{nd1} , k_{nd2} и T_{nd2} – коэффициенты передачи и постоянные времени ПД-регуляторов; k_{cn1} и k_{cn2} – коэффициенты передачи силовых преобразователей; k_{occ1} и k_{occ2} – коэффициенты передачи обратных связей по скорости; $W_{U1}(p)$ и $W_{U2}(p)$ – передаточные функции противоположных электромагнитов, связывающие перемещение ротора с напряжениями на обмотках магнитов.

Передаточные функции электромагнитов ЭМ1 и ЭМ2 равны [2]:

$$W_{U1}(p) = \frac{y(p)}{U_1(p)} = \frac{k_{U1}(b_{01}p+1)}{a_0p^4+a_1p^3+a_2p^2+a_3p-1}, \quad (1)$$

$$W_{U2}(p) = \frac{y(p)}{U_2(p)} = -\frac{k_{U2}(b_{02}p+1)}{a_0p^4+a_1p^3+a_2p^2+a_3p-1}. \quad (2)$$

$$\text{где } k_{U1} = \frac{d_3}{k_{Fy}-d_5+d_6}; b_{01} = T_2; a_0 = \frac{mT_1T_2}{k_{Fy}-d_5+d_6}; a_1 = \frac{m(T_1+T_2)}{k_{Fy}-d_5+d_6}; \quad (3, 4, 5)$$

$$a_2 = \frac{m+d_1T_2+d_2T_1-k_{Fy}T_1T_2}{k_{Fy}-d_5+d_6}; a_3 = \frac{d_1+d_2+(d_5-k_{Fy})T_2-(d_6+k_{Fy})T_1}{k_{Fy}-d_5+d_6}; \quad (6, 7)$$

$$k_{U2} = \frac{d_4}{k_{Fy}-d_5+d_6}; b_{02} = T_1; \quad (8)$$

$$d_1 = \frac{4k_{F1}^2I_{10}^2}{(\delta-y_0)^4R_1+2k_{F1}V_0(\delta-y_0)^2}; d_2 = \frac{4k_{F1}^2I_{20}^2}{(\delta+y_0)^4R_2-2k_{F1}V_0(\delta+y_0)^2}; \quad (9, 10)$$

$$d_3 = \frac{2k_{F1}I_{10}}{(\delta-y_0)^2R_1+2k_{F1}V_0}; d_4 = \frac{2k_{F1}I_{20}}{(\delta+y_0)^2R_2-2k_{F1}V_0}; \quad (11, 12)$$

$$d_5 = \frac{4k_{F1}^2I_{10}[2I_{10}V_0+(\delta-y_0)I'_{10}]}{(\delta-y_0)^3[R_1(\delta-y_0)^2+2k_{F1}V_0]}; d_6 = \frac{4k_{F1}^2I_{20}[2I_{20}V_0-(\delta+y_0)I'_{20}]}{(\delta+y_0)^3[R_2(\delta+y_0)^2-2k_{F1}V_0]}; \quad (13, 14)$$

$$k_{Fy} = k_{F1} \left[\frac{2I_{10}^2}{(\delta-y_0)^3} + \frac{2I_{20}^2}{(\delta+y_0)^3} \right]; T_1 = \frac{2k_{F1}(\delta-y_0)}{(\delta-y_0)^2R_1+2k_{F1}V_0}; T_2 = \frac{2k_{F1}(\delta+y_0)}{(\delta+y_0)^2R_2-2k_{F1}V_0}. \quad (15, 16, 17)$$

где m – часть массы ротора, приходящаяся на один канал управления электромагнитного подшипника; k_{F1} – конструктивный коэффициент; δ – зазор между статором и ротором при расположении ротора в центре магнитной системы; y – перемещение ротора относительно центра магнитной системы; U_1 и U_2 – напряжения, подаваемые на обмотки электромагнитов ЭМ1 и ЭМ2; y_0 , I_{10} и I_{20} – начальные значения положения ротора и токов электромагнитов; I'_{10} , I'_{20} , и V_0 – начальные значения скорости изменения токов в обмотках электромагнитов и скорости перемещения ротора; p – комплексная переменная.

Эти передаточные функции справедливы для любого положения ротора и различных способов регулирования напряжений противоположных магнитов и учитывают начальные значения скорости перемещения ротора и производных токов.

2. Моделирование

В данной статье рассматривается система управления радиальным электромагнитным подшипником опытного турбоагнетателя БТК-Э с независимым регулированием токов противоположных магнитов.

Для построения расчетной модели необходимо рассчитать параметры передаточных функций и регуляторов. Рациональное смещение центра магнитной системы относительно оси вращения, обеспечивающее компенсацию веса ротора составляет $y = 125 \text{ мкм}$ [3]. Электромагниты турбоагнетателя при этом обладают следующими параметрами: $k_{F1} = 6.71 * 10^{-4} \text{ Нм}^2/\text{А}^2$, $T_1 = 0.037 \text{ с}$, $T_2 = 0.022 \text{ с}$, $R_1 = R_2 = 96.6 \text{ Ом}$, $k_{Fy} = 3 * 10^6 \text{ Н/м}$. При расчёте принимаются следующие начальные условия: $I_{10} = I_{20} = 0.311 \text{ А}$, $V_0 = 0 \text{ А}$. С учетом того, что система управления электромагнитным подшипником оснащена датчиком



положения ротора и силовыми преобразователями с коэффициентами передачи $k_{on} = 10000000$ дискрет/м, $k_{cn1} = k_{cn2} = 0.0015$ В/дискрета, а коэффициенты передачи П и ПД регуляторов выбраны равными $k_{n1} = k_{n2} = k_{nd1} = k_{nd2} = 2$, рассчитав регуляторы по известной методике [4] получим следующие требуемые настройки: $T_{nd1} = 0.111c$, $T_{nd2} = 0.067c$, $k_{occ1} = k_{occ2} = 5.52 \cdot 10^{-4}c$, $T_{u1} = 0.008c$, $T_{u2} = 0.018c$.

Для построения переходных процессов в системе управления электромагнитным подшипником при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения разработана расчётная модель, которая учитывает выбранные параметры регуляторов (рисунок 2).

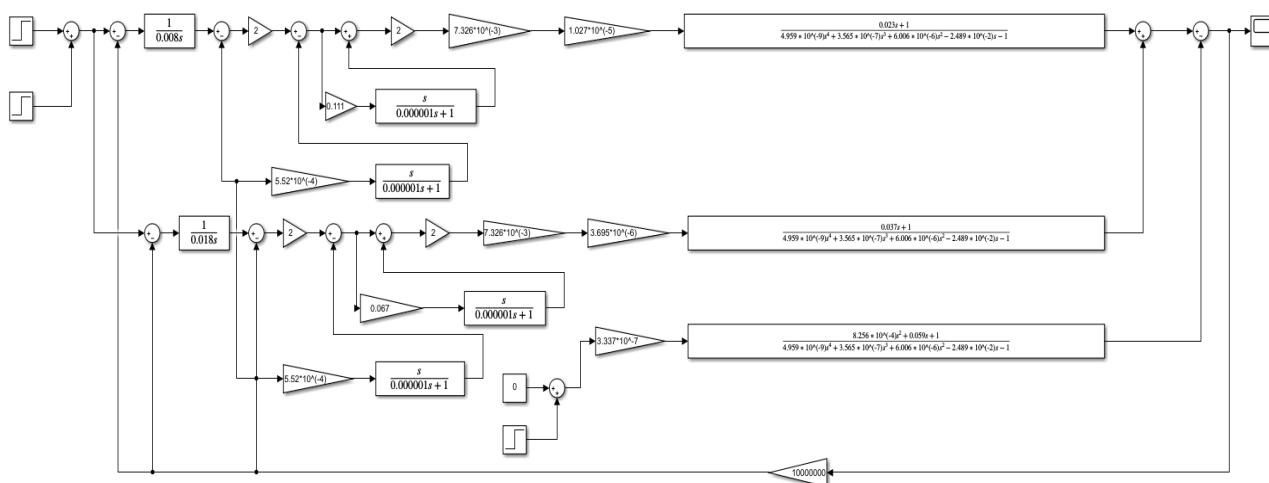


Рисунок 2. Расчётная модель в программной среде Matlab Simulink

Данная расчётная модель позволяет построить графики переходных процессов по управляющему (рисунок 3) и возмущающему (рисунок 4) воздействию (наброс силы 50Н). Анализ графиков показывает, что время переходного процесса по управляющему воздействию составило 0.059с, а переходные процессы по возмущающему воздействию позволяют сделать вывод, что при набросе внешней силы в 50 Н динамический провал кривой составит 2мкм.

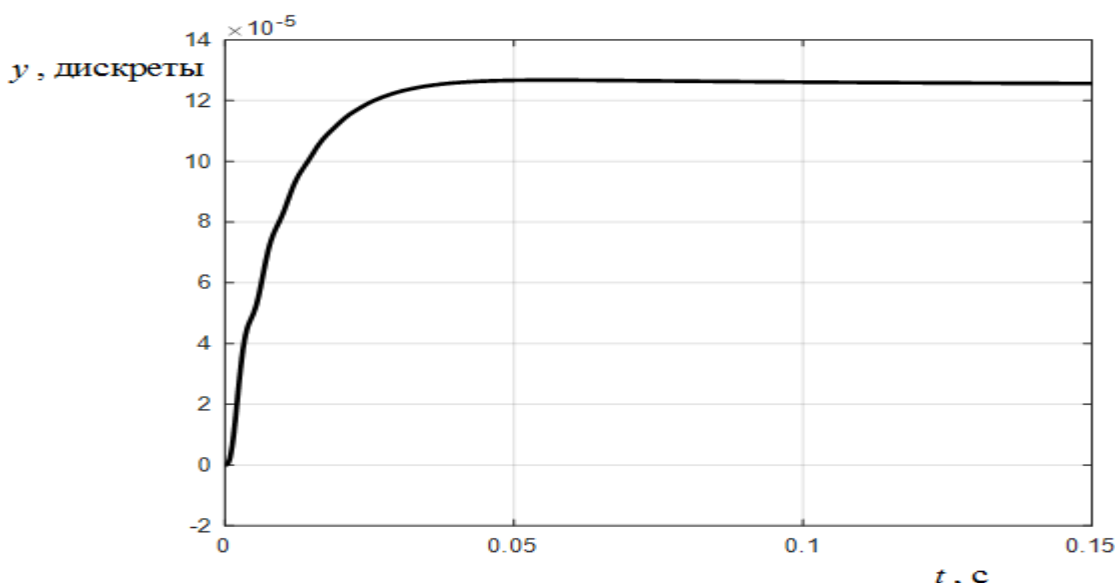


Рисунок 3. Переходный процесс по управляющему воздействию



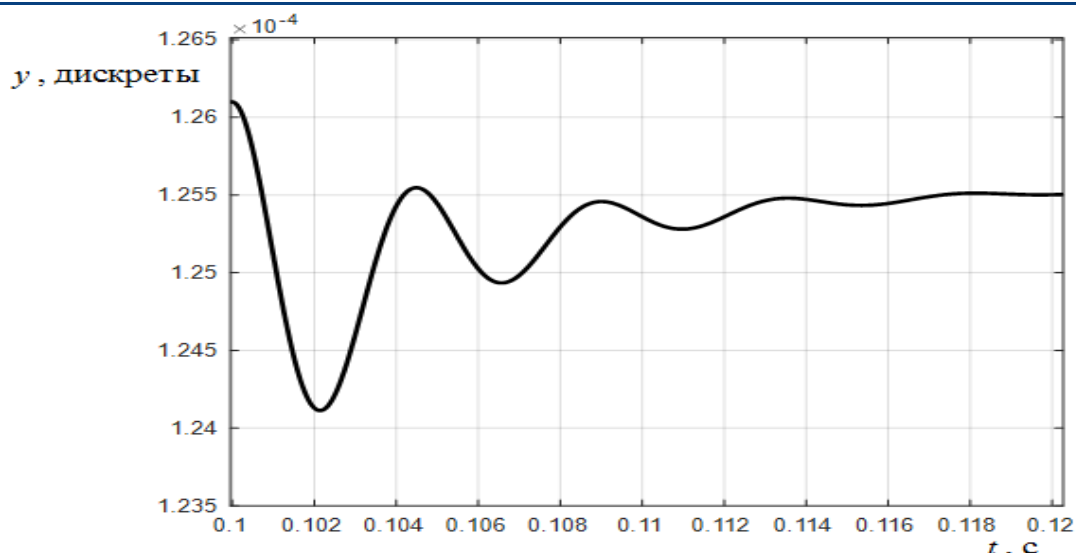


Рисунок 4. Переходный процесс по возмущающему воздействию

Компьютерное моделирование подтвердило, что применение независимого регулирования токов позволяет повысить быстродействие и динамическую жесткость электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения. Предлагаемый подход сочетает высокую энергетическую эффективность, простоту настройки и надёжность, что делает его перспективным для практического применения.

Список литературы:

1. Патент России № 2831082. Система управления электромагнитным подвесом ротора / Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков, В.Д. Костюков (Россия) // Оpubл. 02.09.2024, Бюл. № 25.
2. Стариков А.В., Костюков В.Д., Козловский В.Н., Пантюхин О.В. Линеаризованная математическая модель электромагнитного подшипника при независимом управлении напряжениями противоположных магнитов / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 9, 2023. – С. 388 – 392.
3. Стариков А.В., Костюков В.Д. Определение рациональной величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника / Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», Т. 31, № 3, 2023. – С. 103 – 123.
4. Костюков В.Д., Крылов Г.А., Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Выбор параметров регуляторов электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора // Вопросы электротехнологии. 2024. № 4 (45). С. 62–70.

