

I. S. Dymov, D. A. Kotin, E. S. Kucher, Yu. V. Pankratz  
Novosibirsk State Technical University

## APPROACH TO PROCESS IMPLEMENTATION OF ACTIVE STABILIZATION THE SPATIAL POSITION OF MECHATRONIC DEVICES ROTOR

*Devoted to the development and the research of technical solutions centering problem of the spatial position of the mechatronic device rotor used in high-precision processing systems. A new approach to solving the problem of stabilizing the rotating element of the mechatronic device is offered, based on the active current updating of the spatial position. It is presented the approach description, results of the simulation, confirming the advances of the line research.*

**Mechatronic device, active stabilization, balancing, spatial position controller**

УДК 62-523.2

С. Ю. Логинов  
Псковский государственный университет

## Наблюдатель состояния в осевом активном магнитном подвесе

*Рассмотрены принципы построения системы управления осевым активным магнитным подвесом роторов. Представлена модель на основе цифрового ПД-регулятора, показано влияние ошибки датчика положения на устойчивость системы. Рассматриваются два варианта борьбы с шумом измерения: применение фильтра низких частот и наблюдателя состояния.*

### Осевой активный магнитный подвес, система управления, ПД-регулятор, уменьшение помех, наблюдатель состояния

Активные магнитные подвесы (АМП) роторов находят все более широкое применение в различных областях промышленности. Отсутствие механического контакта позволяет использовать их в сверхвысокоскоростных электроприводах, которые становятся все более востребованными. Расчет нагрузочных параметров и электромеханической части АМП имеет стандартные методики, однако совершенствование системы управления подвесом остается актуальной задачей для дальнейшего исследования [1].

Основной проблемой при создании АМП становится наличие шумов при измерении положения ротора, что обусловлено одновременно высокими требованиями к точности и быстродействию датчика положения. Целью данной статьи является изучение влияния шумов на систему однокоординатного магнитного подвеса и рассмотрение возможности оптимальной фильтрации.

**Описание системы управления АМП.** Будем рассматривать систему управления активным магнитным подвесом, которая предназначена для стабилизации положения ротора в осевом направлении. Она включает в себя датчик осевого смещения

ротора и микропроцессор, преобразующий сигнал с датчика положения ротора в управляющий сигнал для силового блока управления, который формирует токи в обмотках подвеса.

Существуют различные системы управления АМП: на основе различных регуляторов, адаптивные системы, робастные, системы на основе нейронных сетей и т. д. Наиболее проста система на основе ПД-регулятора.

Допустим, нужно, чтобы свободное движение подвешиваемого тела, описываемое известным уравнением [2]

$$m\ddot{x} - k_x x = k_i i, \quad (1)$$

в точности совпадало при одинаковых начальных условиях со свободным движением механического линейного осциллятора с вязким трением, описываемого уравнением  $m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = 0$  или

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (2)$$

Здесь  $m$  – масса ротора;  $x$  – координата положения;  $k_x$  и  $k_i$  – «отрицательная» позиционная и токовая жесткости подвеса соответственно;  $b$  –

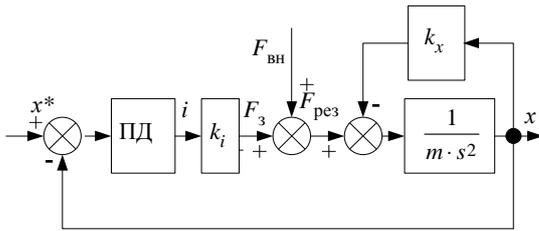


Рис. 1

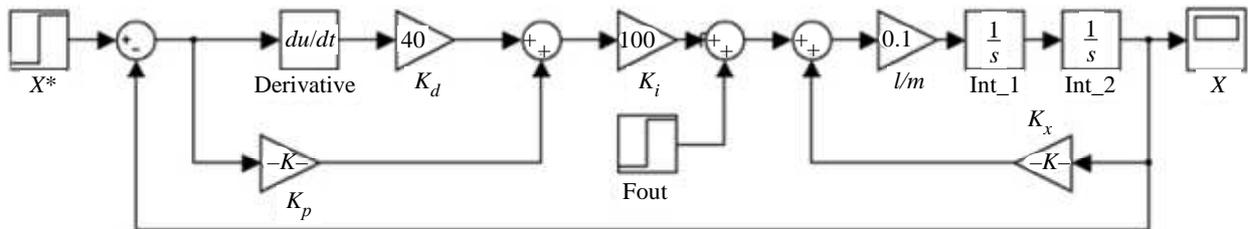


Рис. 2

коэффициент вязкого трения демпфера;  $c$  – жесткость пружины,  $\xi = b/(2m\omega_0)$  – безразмерный параметр затухания;  $\omega_0 = \sqrt{c/m}$  – частота недемпфированных свободных колебаний. Очевидно, что для совпадения движений систем при одинаковых начальных условиях необходимо и достаточно, чтобы текущие значения ускорений обеих систем были одинаковы. Выражая из (2) ускорение  $\ddot{x}$  и подставляя его в (1), получим закон управления тока вида

$$i = -k_p x + k_d \dot{x}, \quad (3)$$

где  $k_p = (m\omega_0^2 + k_x)/k_i$  и  $k_d = 2\xi m f \omega_0/k_i$  – коэффициенты усиления обратной связи по перемещению по скорости.

Регулятор, реализующий закон управления (3), называется ПД-регулятором.

Структурная схема управления АМП по одной координате представлена на рис. 1 [3], где  $x^*$  – задающий сигнал положения;  $i$  – ток задания;  $k_i$  – коэффициент «сила–ток»;  $F_3$  – задающее значение силы;  $F_{вн}$  – внешнее возмущающее воздействие;  $k_x$  – коэффициент «сила–перемещение».

Зададимся следующими реальными значениями параметров:  $m = 10$  кг,  $k_i = 100$  Н/А,  $k_x = 150\,000$  Н/м, а также частотой недемпфированных колебаний  $\omega_0 = 600$  рад/с и параметром затухания  $\xi = 0.33$ . Тогда  $k_p = 25\,000$  А/м,  $k_d = 40$  А · с/м.

Модель в среде Simulink представлена на рис. 2.

В результате при внешнем ступенчатом воздействии силы  $F_{out} = 200$  Н в момент времени 0.05 с получим переходный процесс, показанный на рис. 3.

Из графика видно, что в установившемся режиме наблюдается смещение ротора на величину порядка 85 мкм, обусловленное внешней силой. Задавая другие значения ПД-регулятора, можно получить желаемую переходную характеристику. Однако при моделировании вводилось допущение, что переменные состояния (перемещение, скорость) могут быть точно измерены в любой

момент времени. В действительности всегда существует ошибка измерения. Надежных способов измерения скорости и ускорения применительно к вращающимся роторам на данный момент нет, поэтому эти величины, как и интеграл от перемещения (для реализации ПИД-регулятора), не измеряются, а вычисляются. Наиболее простой способ вычисления скорости и ускорения – применение дифференцирующих звеньев. Однако при этом возникают трудности, связанные с проблемой шумов измерения. Амплитуда сигнала на выходе дифференцирующего звена пропорциональна частоте, поэтому, если не ограничить частотный диапазон, уровень высокочастотных составляющих шума измерения, усиленных дифференцирующими звеньями, может привести к неработоспособности системы.

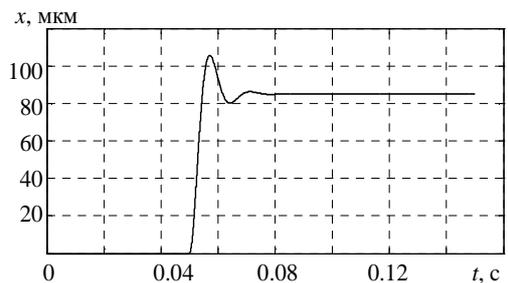


Рис. 3

На рис. 4 представлена модель системы с АМП с цифровым регулятором. На практике он реализуется на базе микроконтроллера. Кроме того, имеется блок «eppoc», имитирующий помеху сигнала датчика.

В результате получаем переходный процесс, показанный на рис. 5.

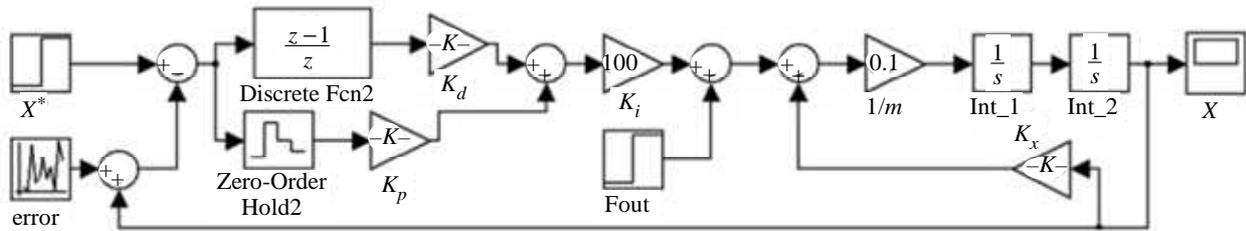


Рис. 4

Следует отметить, что без учета помехи и при правильно подобранных коэффициентах график выглядит аналогично представленному на рис. 3.

К важным особенностям реального АМП относятся ограниченные возможности усилителя тока и ограничение перемещения, обусловленного размером зазора. Если ввести звено ограничения тока перед блоком  $K_i$ , то подвес потеряет устойчивость (рис. 6).

Из графика видно, что смещение ротора достигает значения 1.6 мм, в то время как зазор составляет порядка 0.5 мм, следовательно, система выходит из работоспособного состояния.

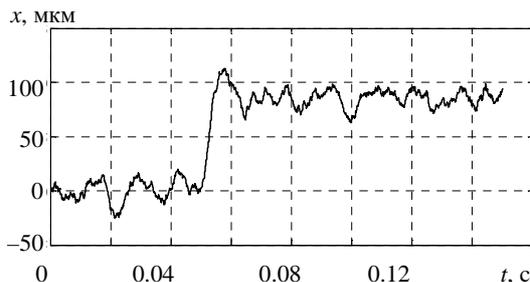


Рис. 5

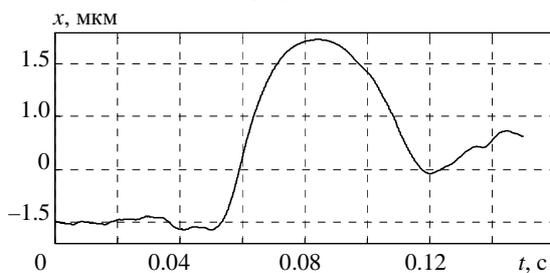


Рис. 6

**Фильтрация шумов измерения. Наблюдатель состояния.** Для борьбы с шумами используются фильтры низких частот (ФНЧ), например фильтр второго порядка с передаточной функцией

$$W_f(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_f s + \omega_f^2}, \quad (4)$$

где  $\omega_f$  – собственная частота фильтра. Пусть  $\omega_f = 6000$  рад/с. Если в модель включить фильтр с передаточной функцией (4) перед ПД-регуля-

тором (он может быть реализован программно на микроконтроллере), то даже со звеном ограничения тока система будет устойчива (рис. 7).

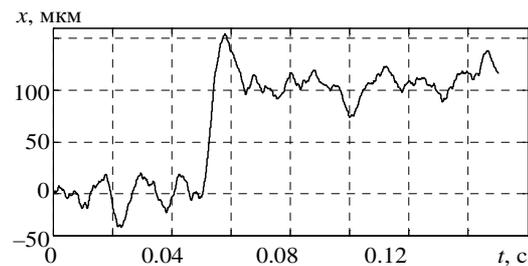


Рис. 7

Недостатком применения фильтра является подавление полезного сигнала. Это приводит к тому, что управляющая переменная в регуляторе формируется не по действительным значениям, а по их приближенным оценкам. Стремление преодолеть этот недостаток привело к созданию теории оптимальной фильтрации или фильтра Калмана–Бьюси [4].

Основное понятие в теории оптимальной фильтрации – наблюдатель состояния. Это динамическое звено, представляющее, по сути, модель объекта управления, на вход которого подаются измеряемая и управляющая переменные, а выходами служат переменные восстановленного состояния. Подавление шума измерения в наблюдателе происходит без ослабления выходных переменных.

Построим наблюдатель полного порядка для подвеса. Потребуем, чтобы характеристический полином наблюдателя был полиномом Баттерворта второго порядка [5]  $\Delta(s) = s^2 + \sqrt{2}\omega_n s + \omega_n^2$  с радиусом распределения полюсов  $\omega_n$ . Тогда элементы матрицы коэффициентов усиления наблюдателя  $N = (n_1, n_2)^T$ :  $n_1 = \sqrt{2}\omega_n$ ,  $n_2 = \omega_n^2 + k^2$ . Наблюдатель будет обладать достаточным быстродействием, если назначить  $\omega_n = (3...5)\omega_0$ . Зададимся значением  $\omega_n = 3000$  рад/с.

Модель канала управления АМП по току с наблюдателем полного порядка и ПД-регуля-

