

УДК 681.785.5

Линейный привод фурье-спектрометра

© 2020 г. А. А. Балашов*, доктор техн. наук; Иг. Н. Нестерук**; Ир. Н. Нестерук**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

**Институт спектроскопии Российской академии наук, Москва

E-mail: inetst55@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-05-77-80

Представлен линейный привод системы сканирования фурье-спектрометра, выполненный с использованием нового типа линейного двигателя с подвижным магнитом. Построена модель привода и системы сканирования для оценки качества системы сканирования с описанным приводом.

Ключевые слова: фурье-спектрометр, система сканирования, датчик скорости, линейная направляющая, линейный двигатель, регулирующее устройство.

Код OCIS: 120.6200

ВВЕДЕНИЕ

В динамических фурье-спектрометрах (ФС) для перемещения подвижного отражателя интерферометра используют различные приводы линейного перемещения. Основными узлами таких приводов являются линейный двигатель (ЛД) и линейная направляющая (ЛН). В зависимости от спектральной области работы и разрешения эти узлы должны обеспечивать необходимую точность перемещения подвижного отражателя, а также размер его перемещения [1]. Конструкция ЛД и ЛН существенным образом зависит от диапазона перемещения. В данной работе представлена конструкция привода, позволяющая реализовать систему сканирования ФС на диапазон от единиц миллиметров до 100 мм. В качестве ЛН использована линейная рельсовая направляющая типа LM с шариковым сепаратором фирмы THK и новый тип ЛД с подвижным магнитом [2]. Для расширения спектральной области работы ФС в коротковолновой области использовались отражатели в виде зеркальных триэдров фирмы PLX на апертуру 2,5 дюйма.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

На рис. 1 представлены общий вид и схема привода на перемещение 10 мм.

Триэдр закреплен на кронштейне, который установлен на каретке, перемещающейся по рельсу ЛН. В приводе использованы два ЛД. Каждый ЛД состоит из двух магнитопроводов, на которых расположены обмотки управления. Магнитопроводы соединены между собой немагнитными перемычками. В воздушном зазоре между магнитопроводами ЛД находится магнит, закрепленный на кронштейне. Линейные двигатели расположены с двух сторон, симметрично относительно ЛН.

При протекании тока в обмотках на магнит действует сила, направленная вдоль магнитопроводов. Симметричное расположение ЛД относительно направляющей необходимо, чтобы исключить перекосы действующих сил на каретку — для более плавного ее перемещения. Для снижения нагрузки на линейную направляющую магниты двигателей должны быть расположены симметрично между соответствующими магнитопроводами, так как

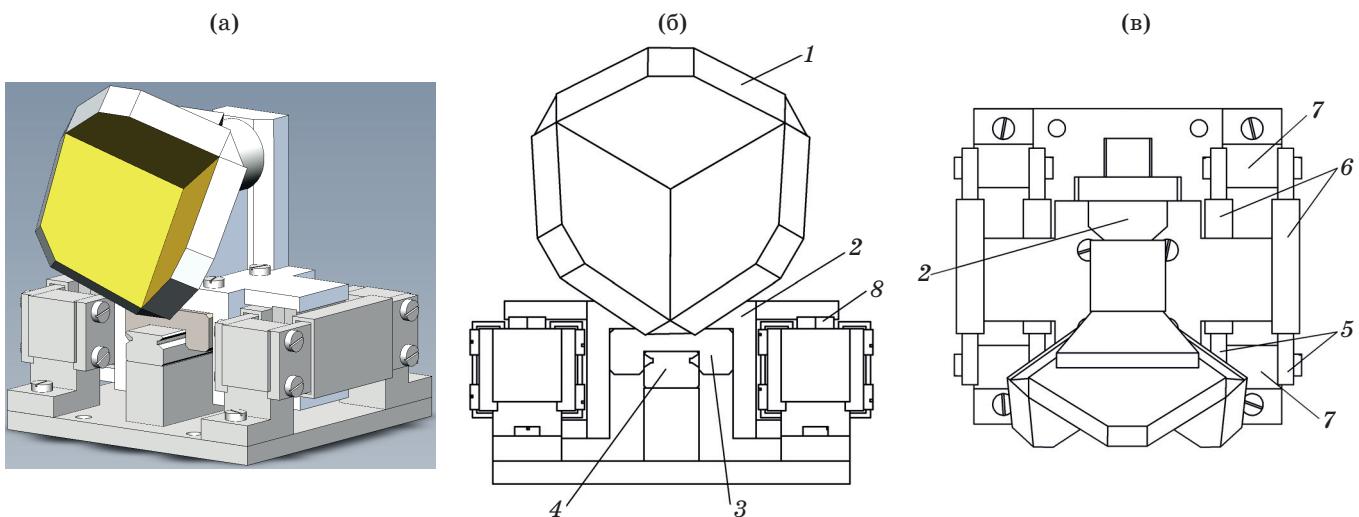


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б, в) ЛП на перемещение 10 мм. 1 — триэдр, 2 — кронштейн, 3 — каретка ЛН, 4 — рельс ЛН, 5 — магнитопроводы ЛД, 6 — обмотки управления, 7 — немагнитная перемычка, 8 — магнит ЛД.

в данной точке действие сил на магниты в направлении магнитопроводов минимально. Как показано в работе [3], использование шариковой рельсовой направляющей требует наличия обратной связи (ОС) по скорости для обеспечения ее стабилизации. Кроме того, требуется необходимое быстродействие петли ОС для снижения колебаний скорости, связанных с «шумом» шариковой направляющей при скорости сканирования выше нескольких сантиметров в секунду. Также высокое быстродействие системы сканирования ФС обеспечивает хорошую ее виброустойчивость.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИВОДА

Быстродействие системы сканирования ФС в основном зависит от динамических параметров привода. Привод на перемещение 10 мм имеет следующие основные параметры:

Коэффициент преобразования силы $K_m = 4,5 \text{ Н/А}$,

Индуктивность управляющей обмотки (суммарная) $L = 2,5 \text{ мГн}$,

Сопротивление управляющей обмотки (суммарное) $r = 7,2 \text{ Ом}$,

Коэффициент наведенной ЭДС $K_e = 4,5 \text{ В с/М}$,

Масса подвижной части $m = 360 \text{ г}$,

Резонанс кронштейна с отражателем $f = 6,4 \text{ кГц}$.

Передаточная функция привода для перемещения $W_x(p)$ без учета резонанса кронштейна имеет вид

$$W_x(p) = \frac{U}{(T_1 p^2 + T_2 p + 1)p},$$

$$T_1 = \frac{mL}{K_e K_m}, \quad T_2 = \frac{mr}{K_e K_m},$$

где U — управляющее напряжение, p — комплексная переменная преобразования Лапласа, T_1 и T_2 — электромеханические постоянные времени.

Упрощенная передаточная функция $W_v(p)$ скорости перемещения без учета резонанса кронштейна имеет вид

$$W_v(p) = \frac{U}{K_e (Tp + 1)(T_2 p + 1)}, \quad T = \frac{L}{r},$$

T — электрическая постоянная времени.

Электрическая постоянная времени L/r составляет около 0,35 мс, электромеханическая постоянная времени — около 128 мс, а максимальная скорость перемещения — 1,6 м/с.

Разработанный привод на перемещение 10 мм использован в макетах ФС [4, 5]. Система сканирования реализована с датчиком скорости частотно-импульсного типа, вторичный преобразователь которого преобразует частоту референтного канала в последовательность

импульсов фиксированной длительности с последующей низкочастотной фильтрацией, выделяя постоянную составляющую напряжения, пропорциональную скорости перемещения отражателя. Регулирующее устройство системы сканирования формирует пропорционально-интегральный закон управления с высокочастотной коррекцией. Время установления переходного процесса в системе сканирования с ошибкой не более 0,1% составляет 25 мс. Смещение триэдра в плоскости, перпендикулярной оси сканирования, без учета погрешности юстировки, определяемой неточностью изготовления линейной направляющей, не превышает 1 мкм на длине перемещения 250 мм в вертикальном и горизонтальном направлениях, что гарантирует изготовитель. Неравномерность скорости сканирования при скорости 3 мм/с составляет 0,75% (среднеквадратическая ошибка в 2 раза меньше). Основной вклад в неравномерность скорости сканирования вносит вибрация основания прибора из-за недостаточного быстродействия системы сканирования, связанного с низким быстродействием используемого датчика скорости.

Для оценки предельных параметров системы сканирования с данным приводом с использованием программы B2Spice2015 построена модель системы сканирования. Для этого передаточная функция по скорости представлена в упрощенном виде с учетом резонанса кронштейна

$$W_y(p) = \frac{U}{K_e(Tp+1)(T_2p+1)} \frac{1}{T_3^2 p^2 + 2\zeta_1 T_3 p + 1},$$

$$T_3 = \frac{1}{2\pi f},$$

где T_3 — постоянная времени, определяемая резонансом кронштейна, ζ_1 — коэффициент демпфирования.

На рис. 2 приведена амплитудно-частотная характеристика модели разомкнутой системы сканирования с последовательной коррекцией в виде звена первого порядка [6] с учетом параметров быстродействующего датчика скорости с нелинейным преобразованием синусоидального сигнала референтного канала ФС в напряжение, пропорциональное скорости, [7].

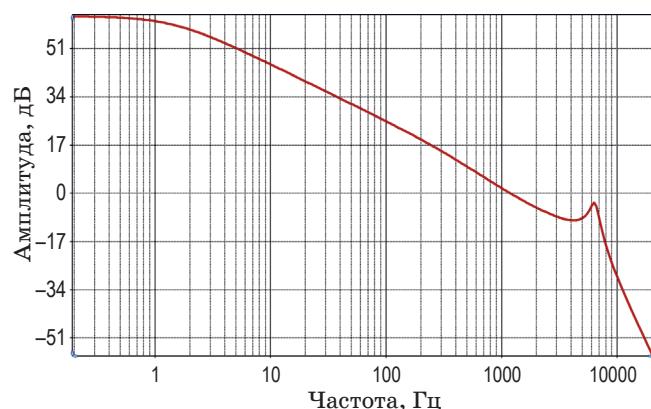


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика модели разомкнутой системы сканирования.

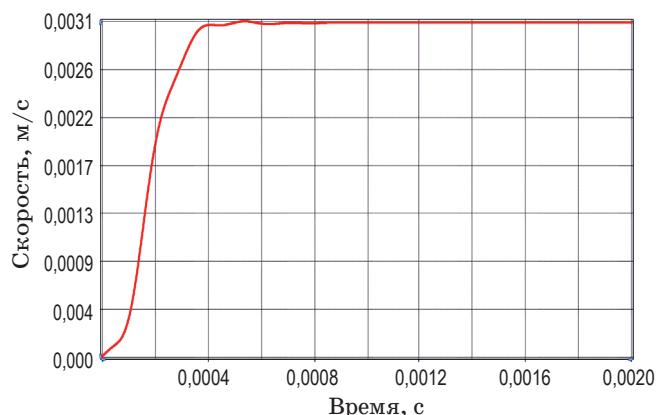


Рис. 3. Переходный процесс модели замкнутой системы сканирования.

Из характеристики видно, что частота среза составляет около 1 кГц (пересечение характеристики с осью 0 дБ).

Рисунок 3 иллюстрирует переходный процесс модели замкнутой системы сканирования при скорости 3 мм/с.

Как видно из графика, время установления переходного процесса составляет менее 1 мс. Если не учитывать в модели инерционность датчика скорости, то время затухания переходного процесса практически не меняется. Из этого можно сделать вывод, что данное значение и есть предельное быстродействие привода.

Для оценки виброустойчивости на выход модели замкнутой системы сканирования подан эквивалент виброскорости в виде синусоидальной зависимости с амплитудой 1 мм/с и построена зависимость от частоты подавления виброскорости (рис. 4).

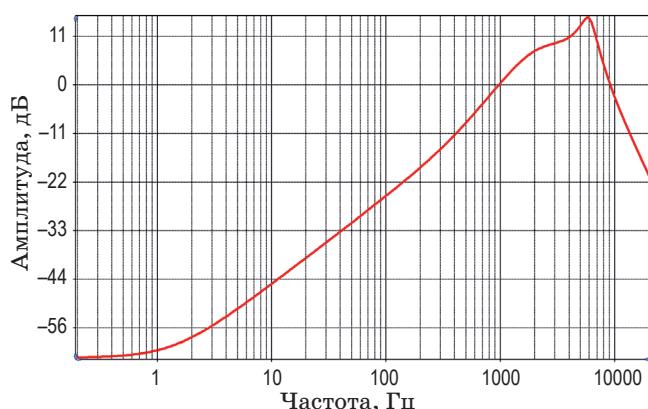


Рис. 4. Частотная зависимость подавления виброскорости модели системы сканирования ЛП на перемещение 10 мм.

Из этой зависимости видно, что подавление на частотах 20, 100 и 500 Гц составляет соответственно 100, 18,8 и 2,3 раза. По данной модели также проведена оценка погрешности скорости сканирования, которая составила 0,066% при скорости сканирования 3 мм/с.

Второй вариант привода был разработан на перемещение 80 мм. Для оценки эффективности этого привода построена характеристика подавления виброскорости от частоты. На частотах 20, 100 и 500 Гц ее подавление составляет соответственно 250, 42 и 3,7 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные с помощью модели системы сканирования, позволяют сделать вывод, что представленный тип привода с использованием нового линейного двигателя позволяет создавать приводы в широком диапазоне перемещений подвижного отражателя ФС с хорошими динамическими характеристиками, которые превышают параметры, достигнутые в решении [8].

При использовании плоского зеркала на апертуру 50 мм в качестве подвижного отражателя возможно дополнительно повысить быстродействие привода, так как его масса примерно в 2 раза меньше триэдра. В этом случае требуется высококачественная линейная направляющая при перемещении более 10 мм или стабилизация углового положения зеркала.

Применение программы B2Spice2015 для моделирования аналоговых систем с обратной связью позволяет максимально учесть реальные параметры электронного регулятора, так как строится на моделях реальных компонентов и таким образом автоматически учитывает малые параметры и нелинейности используемой электроники, что существенно упрощает построение моделей реальных устройств и сокращает время разработки.

Также можно отметить, что данный привод может использоваться во многих других приложениях в оптических приборах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белл Р.Дж. Введение в фурье-спектроскопию: пер. с англ. / Под ред. Жижина Г.Н. М.: Мир, 1975. 380 с.
2. Балашов А.А., Нестерук Иг.Н., Нестерук Ир.Н. Линейный двигатель с подвижным магнитом // RU патент. № 2648682. 2018.
3. Nishizawa, Seizi, Shirawachi, Kikuo. Michelson interferometer // United States Patent. № 4575246. 1986.
4. Балашов А.А., Вагин В.А., Голяк Ил.С. и др. Раман-спектрометр на основе динамического фурье-спектрометра видимого и ближнего ИК диапазона // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. № 3(25). С. 83–89.
5. Балашов А.А., Вагин В.А., Голяк Ил.С. и др. Фурье-спектрометр видимого и ближнего ИК диапазона // Радиостроение. 2017. № 6. С. 27–38.
6. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления: пер. с англ. М.: Лаборатория базовых знаний ЮНИМЕДИАСТАЙЛ, 2002. С. 568.
7. Нестерук Иг.Н., Нестерук Ир.Н. Датчик скорости системы сканирования Фурье-спектрометра // Датчики и системы. 2019. № 1. С. 55–58.
8. Coffin J.M. Flexure mounted moving mirror to reduce vibration noise // United States Patent. № 8947670. 2015.