

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

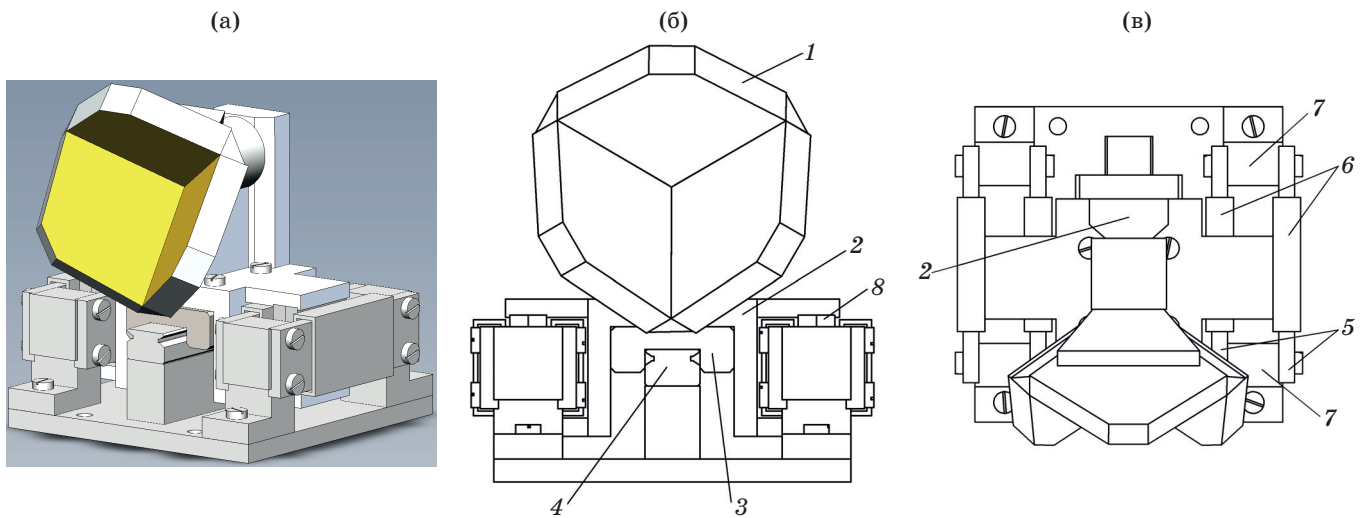
В динамических фурье-спектрометрах (ФС) для перемещения подвижного отражателя интерферометра используют различные приводы линейного перемещения. Основными узлами таких приводов являются линейный двигатель (ЛД) и линейная направляющая (ЛН). В зависимости от спектральной области работы и разрешения эти 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  $K_e = 4,5 \text{ В/М}$ ,

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 быстрого действия 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,  $\zeta_1$  — 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].

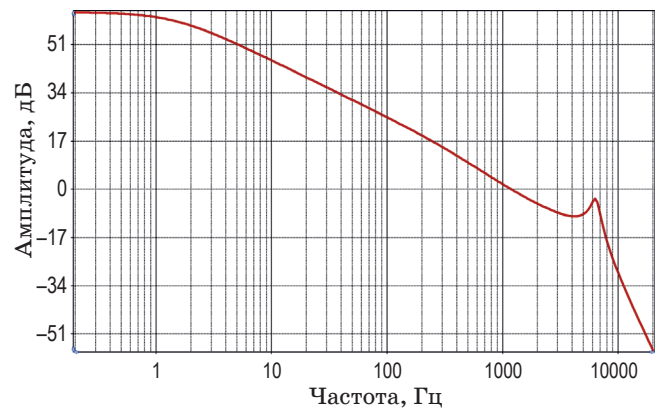


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика модели разомкнутой системы сканирования.

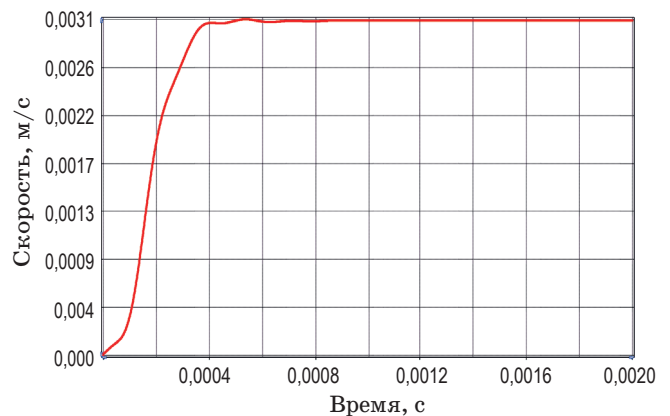


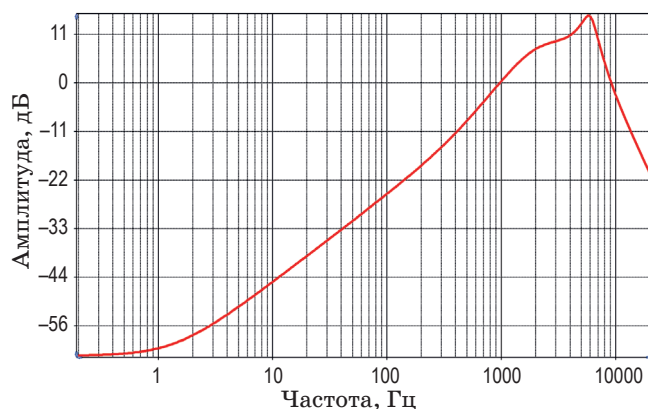
Рис. 3. Переходный процесс модели замкнутой системы сканирования.

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. Жижилина 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.