

## Проектирование, изготовление и испытания гальванометрического сканера

С. Н. Лепешкин, В. В. Молчанов, Ю. И. Шанин, И. С. Шарапов

*Гальванометрический сканер (гальвосканер) – устройство для осуществления поворота лазерного пучка на определенный угол. В статье рассмотрены как подходы к проектированию элементов гальвосканера (электродвигателя постоянного тока, сканирующего зеркала, датчика угла поворота, платы драйвера управления гальвосканером), так и результаты испытаний его работоспособности после изготовления. Привод зеркала и датчика осуществлялся бесколлекторным моментным электродвигателем постоянного тока с ротором из постоянного сильного магнита, изготовленного из неодима, бора и железа – NdFeB. Зеркала изготавливались из монокристаллического кремния и рассчитаны на апертуру входного лазерного пучка 15 мм. Зеркала имеют отражающее покрытие, обеспечивающее коэффициент зеркального отражения  $R \geq 99,6\%$  для длины волны лазера  $\lambda = 1080 \pm 1$  нм. Разработана конструкция оптического абсолютного датчика угла поворота (энкодер) с применением светодиодов и фотодиодов. При разработке платы управления (драйвера) гальвосканером использована гибридная аналогово-цифровая архитектура, цифровая часть драйвера – цифровой сигнальный процессор.*

*Гальвосканеры были испытаны на работоспособность по разработанной программе и методике на специальном стенде и оборудовании, изготовленном для испытаний. В результате испытаний основные проектные характеристики (углы сканирования, шаг сканирования, скорость сканирования и позиционная повторяемость, температурное смещение нуля и долговременный дрейф) были превышены.*

*Ключевые слова:* гальванометрический сканер, гальвосканер, гальвомотор, дефлектор, сканирующее зеркало, датчик угла поворота.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-490-500

### Введение

Среди рабочих инструментов, которыми оснащены лазерные технологические ком-

плексы, важная роль отведена лазерным технологическим головкам, включая лазерные сканаторы, оптическая система которых обеспечивает требуемые пространственные характеристики лазерного излучения в рабочей зоне [1]. Лазерные гальванометрические сканаторы широко используются в промышленности, медицине, в научных исследованиях. Наиболее динамичное развитие они нашли в лазерной маркировке различных изделий [2]. Основное устройство, входящее в состав сканатора, – гальванометрический сканер, которое представляет собой совокупность электродвигателя постоянного тока со сканирующим зеркалом и датчиком угла поворота. Развитие лазерной и компьютерной техники приводит к ужесточению требований на параметры гальванометрических сканеров: быстродействия,

---

**Лепешкин Сергей Николаевич**, вед. инженер, к.т.н.

E-mail: LepeshkinSN@sialuch.ru

**Молчанов Виктор Владимирович**, вед. инженер-технолог, к.т.н.

E-mail: MolchanovVV@sialuch.ru

**Шанин Юрий Иванович**, в.н.с., к.т.н.

E-mail: ShaninYuI@sialuch.ru

**Шарапов Илья Сергеевич**, зам. директора отделения.

E-mail: SharapovIS@sialuch.ru

АО «НИИ НПО «ЛУЧ».

Россия, 142103, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24.

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2022 г.

© Лепешкин С. Н., Молчанов В. В., Шанин Ю. И., Шарапов И. С., 2022

точности и надежности. Современные сканеры разрабатываются на базе двигателей с ротором в виде подвижного магнита и с оптическими датчиками угла поворота (ДУП) ротора на основе сверхъярких светодиодов и высокостабильных фотодиодов [3]. За рубежом (США, ФРГ, КНР и др.) многие фирмы (Cambridge Technology Inc. [4], Nutfield technology [5], ScanLAB GmbH. [6], Raylase GmbH. [7], Sino-Galvo (Beijing) Technology Co., Ltd [8] и пр.) изготавливают линейки гальванометрических сканеров и сканирующих головок для различных применений. В России гальванометрические сканеры для маркировки выпускает фирма «Атеко-ТМ» [2]. Пути совершенствования конструкций гальвосканеров: увеличение быстродействия за счет применения в качестве ротора сильного постоянного двухполюсного магнита, снижение температурной нестабильности ДУП использованием оптических датчиков, улучшение управления с помощью регуляторов на основе цифрового процессора (DSP).

Несмотря на существование многочисленных реализаций гальвосканеров на практике в литературе процесс проектирования подобных устройств освещен скудно [9, 10]. В данной статье кратко изложены подходы к проектированию основных элементов гальвосканера: электродвигателя, сканирующего зеркала, ДУП и системы управления. Также приведены некоторые результаты испытаний изготовленных гальвосканеров, используемых в сканирующих головках для проведения аддитивного процесса селективного лазерного плавления металлических порошков.

## 1. Разработка гальванометрического сканера

Сканирующая головка состоит из корпуса, в который вставлены два гальвосканера (гальвомотора или дефлектора), к корпусу присоединены коллиматор и F-theta объектив. Совокупность электродвигателя постоянного тока со сканирующим зеркалом и датчиком угла поворота, закрепленных на противоположных концах вала ротора двигателя, в иностранной литературе принято называть гальванометрическим сканером или гальвосканером (или просто гальво). В отечественной

литературе подобное устройство называют дефлектором или гальвомотором. В состав гальвосканера входит также плата управления электродвигателем.

### 1.1. Электродвигатель постоянного тока с ротором из постоянного магнита

Электродвигатель гальвосканера состоит из ротора, опирающегося на шарикоподшипники, статора с размещенной в нем неподвижной катушкой возбуждения, намотанной из медного провода. Требования, предъявляемые к электродвигателям гальвосканера [9]:

- высокое отношение крутящего момента к моменту инерции;
- низкая электрическая и механическая постоянные времени;
- линейная зависимость между крутящим моментом, током и угловым положением;
- отсутствие поперечных сил или возбуждений;
- отсутствие гистерезиса;
- высокая жесткость при кручении и изгибе;
- низкое энергопотребление;
- сбалансированность ротора;
- нечувствительность к внешним возмущениям;
- хорошее рассеивание тепла.

Все современные высокопроизводительные гальванометрические сканеры [9] имеют бесколлекторный моментный электродвигатель постоянного тока с вращающимся сильным постоянным магнитом.

В конструкциях роторов электродвигателей используют семейство постоянных неодимовых магнитов из сплава Nd-Fe-B. Неодимовый магнит – постоянный редкоземельный магнит, состоящий из сплава неодима, бора и железа. Эти сплавы имеют энергетическое произведение (произведение величины индукции на максимальную напряженность поля) до пяти раз большее по сравнению с другими магнитами. Недостаток – низкая температура Кюри, в которой происходит скачкообразное ухудшение магнитных свойств сплава. Для сплава Nd-Fe-B температура Кюри  $\sim 310$  °С. Типичный температурный коэффициент магнитной прочности для таких сплавов  $-0,8\%/^{\circ}\text{C}$

в диапазоне изменения температуры (22–85) °С. Так, например, при разогреве магнита на 60 °С свыше начальной температуры остаточная индукция магнита уменьшается на 48 %. Максимальная рабочая температура для таких сплавов ограничена 80 °С [11].

Одно из преимуществ конструкций бесколлекторных моментных электродвигателей постоянного тока с подвижным магнитом на основе редкоземельных материалов – линейность между током управления, пропускаемого по обмотке статора, и углом поворота ротора. При этом гистерезис поля управления оказывается минимальным [12]. Отличительной особенностью электродвигателей постоянного тока с постоянным магнитом от других типов моментных двигателей является постоянство площади взаимодействия ротора со статором. По этой причине отклонение ротора не создает противодействующих магнитных сил и гальвomotor в принципе является нерезонансным. Гальвomotor характеризуется большим диапазоном углов отклонения ротора, в пределах которого момент сил электропривода не зависит от угла отклонения.

Из вышесказанного следует, что электродвигатель с постоянным магнитом отвечает основным требованиям, предъявляемым к магнитным контурам двигателя.

Моментный электродвигатель также хорошо интегрируется с другими элементами сканера: зеркалом, ДУП и электронным приводным контроллером.

Быстродействие гальвосканера с подвижным магнитом определяется массой и размерами отклоняющего пучок оптического элемента и мощностью мотора.

Электродвигатель постоянного тока с постоянным магнитом представляет собой двухполюсник и состоит из кольцевого магнитопровода (корпус мотора), цилиндрического магнита (ротор) и обмотки управления, являющейся частью статора. Крутящий (вращающий) момент электродвигателя может быть оценен по формуле (1) [9], верной при  $\gamma = 45^\circ$ :

$$M = 0,90KB_r L N I D_k \cos \gamma, \quad (1)$$

где  $D_k$  – средний диаметр катушки статора;  $L$  – длина катушки в осевом направлении;  $N$  – число витков катушки;  $I$  – сила тока;  $B_r$  – остаточная индукция постоянного магнита; кон-

станта  $K$ , принимающая во внимание пространство, выделенное для катушки по отношению к размеру магнита;  $\gamma$  – угол между направлениями от оси магнита к центральной линии обмотки и от оси магнита к виткам обмотки. Константа  $K$  выражается как  $K = (1 + 2gB_r d / (\mu H_c))^{-1}$ , где  $d$  – диаметр магнита;  $H_c$  – сила магнитного размагничивания, коэрцитивная сила материала ротора;  $g$  – радиальный зазор между ротором и внешним корпусом;  $\mu$  – магнитная проницаемость воздуха. Для магнитов из редкоземельных элементов  $B_r / (\mu H_c) \approx 1,1$ , а  $0,5 < K < 1$ .

Статор (внешний корпус двигателя) предпочтительно изготавливать из спеченного никелево-железного сплава высокой плотности. Подходят для этого низкоуглеродистые холоднокатаные стали – пермаллой. Рекомендательная радиальная толщина корпуса для роторов из редкоземельных магнитов примерно должна составлять около четверти диаметра ротора [9].

Оценить угловое ускорение, которое может развивать проектируемый гальвomotor, можно по формуле  $\varepsilon = M/I_p$ , где  $I_p$  – момент инерции ротора (или ротора и дополнительных нагрузок – сканирующего зеркала и ДУП). Уравнение для оценки минимального временного шага или реакции на скачок [9]:

$$t = 2\sqrt{\beta I_p / M},$$

где  $\beta$  – общее угловое смещение (от пика к пику).

Рассеивание тепла является критическим параметром для двигателя гальвосканера, поскольку повышение температуры может привести к многочисленным последствиям с возможным уходом параметров при изменении температуры. Повышение температуры воздействует на:

– увеличение сопротивления катушки статора из медного провода  $R_T = R_{25}(1 + 0,0039\Delta T)$ , где  $\Delta T$  – изменение температуры от значения сопротивления при 25 °С;

– тепловое сопротивление катушки может иметь серьезные последствия для температуры магнита, т. к. среднее повышение температуры катушки может не отражать температуру в центре катушки и температуру магнита;

– тепловая связь ДУП и электродвигателя, где симметрия и конструкция крепления имеют решающее значение для минимизации дрейфа преобразователя. Здесь могут быть применены тепловая развязка датчика от гальвомотора или поддержание температуры датчика на определенном стабильном уровне с помощью своей системы автоматического регулирования температуры.

Конструкция или выбор подшипниковой подвески имеют решающее значение для гальвомотора. Гальванометрические сканеры изготавливаются либо с шарикоподшипниковой, либо с изгибной опорой [9]. При выборе и установке шариковых подшипников необходимо учитывать следующее: а) силы предварительной нагрузки; б) радиальный люфт и допуск; в) смазочный материал; г) ускорение (ускорение более 500g приводит к проскальзыванию шара и раннему отказу); д) жесткость подшипника; е) подбор материала.

Моментные двигатели с подвижным магнитом конструируются с большими воздушными зазорами и поэтому создают незначительные радиальные силы. Поэтому при применении шарикоподшипниковой подвески целесообразно предварительно нагружать шарикоподшипник в осевом направлении. Шариковые подшипники желательно выбирать по их способности работать на высокой скорости. Критичным является предотвращение проскальзывания шариков. Здесь основными решениями являются выбор смазочного материала и величины предварительного натяга. Выбирая подшипники нужно иметь в виду, что периодические высокочастотные непрерывные небольшие движения, обычно на угол менее 1 или 2 градусов, вызывают быстрый катастрофический отказ шарикоподшипника, известный как «ложное бринеллирование» (образование вмятин на поверхностях качения подшипников) или «коррозия при истирании» [9].

Все механические элементы имеют резонансы. Гальвомоторы должны быть сконструированы таким образом, чтобы все его элементы и узлы были как можно более жесткими. В идеале их самая низкая собственная частота должна быть выше самой высокой частоты управляющего сигнала или любой возмущающей частоты, которая может быть передана им. Оценка резонансной частоты вращения вала ротора гальвомотора может

быть проведена по формуле  $\omega_p = \sqrt{C_1 / J_1}$ , где  $C_1 = GJ_p / l_b$  – крутильная жесткость;  $G = E / [2(1 + \nu)]$  – модуль сдвига;  $l_b$  – длина вала;  $J_p = \pi d^4 / 32$  – полярный момент инерции сечения (для вала круглого сечения с диаметром  $d$ ). Тогда:

$$\omega_p = \sqrt{\pi E / [(1 + \nu) \rho l_b]} \quad (2)$$

Ниже приведены некоторые формулы для расчета двигателя постоянного тока [13, 14]. Вращающий момент электродвигателя также рассчитывается по формуле:

$$M = K_T I, \quad (3)$$

где  $K_T$  – постоянная крутящего момента, Н м А<sup>-1</sup>;  $I$  – сила тока, А. Наведенная в обмотке противо-ЭДС, направленная противоположно приложенному к двигателю напряжению:

$$E = K_E \omega,$$

где  $K_E$  – постоянная ЭДС, В с рад<sup>-1</sup>;  $\omega$  – угловая частота, рад с<sup>-1</sup>. Постоянные  $K_T$  и  $K_E$  в точности равны между собой по числовому значению, если они определены в единой системе единиц.

Одним из основных параметров электродвигателя постоянного тока является постоянная электродвигателя  $K_M$ . Постоянная электродвигателя (в Н м Вт<sup>-0,5</sup>) определяет способность электродвигателя преобразовывать электрическую энергию в механическую:

$$K_M = \frac{K_T}{\sqrt{R}} = \frac{M_M}{\sqrt{P_M}},$$

где  $R$  – сопротивление обмоток, Ом;  $M_M$  – максимальный момент, Н м;  $P_M$  – мощность, потребляемая при максимальном моменте, Вт.

Жесткость механической характеристики электродвигателя постоянного тока  $\chi$  определяется формулой:

$$\chi = \frac{K_T^2}{R} = K_M^2 = \frac{M}{\omega}.$$

Уравнение баланса напряжений на зажимах электродвигателя имеет вид:

$$U = RI + K_E \omega = R \frac{M}{K_T} + K_E \omega,$$

где  $U$  – напряжение, В. Соотношение между моментом и частотой вращения при двух раз-

личных напряжениях питания двигателя постоянного тока неизменно. При увеличении частоты вращения момент линейно уменьшается. Наклон этой функции  $K_T K_E / R$  постоянный и не зависит от значения напряжения питания и частоты вращения двигателя.

Упрощенная модель электродвигателя запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} UI &= P_{\text{мех}} + P_{\text{теп}} + P_{\text{инд}} + P_{\text{тр}} = \\ &= M\omega + IR^2 + IL \frac{dI}{dt} + P_{\text{тр}}, \end{aligned}$$

где  $P_{\text{эл}} = UI$  – электрическая мощность (подведенная), Вт;  $P_{\text{мех}}$  – механическая мощность (полезная);  $P_{\text{теп}}$  – тепловые потери;  $P_{\text{инд}}$  – мощность, затрачиваемая на заряд катушки индуктивности;  $P_{\text{тр}}$  – потери на трение;  $R$  – сопротивление токопроводящих элементов, Ом;  $L$  – индуктивность катушки статора, Гн.

Электромагнитная постоянная времени  $\tau_s$ :

$$\tau_s = L / R.$$

Механическая постоянная времени  $\tau_t$  – это время, отсчитываемое с момента подачи постоянного напряжения на электродвигатель, за которое частота вращения ненагруженного электродвигателя достигает уровня в 63,2 %  $(1-1/e)$  от своего конечного значения:

$$\tau_t = \frac{JR}{K_T^2} = \frac{J}{\chi}.$$

Данная характеристика является одним из важнейших параметров электродвигателя и определяет запаздывание первого порядка. При построении переходной характеристики частоты вращения от времени  $\omega(t)$ , чем меньше значение  $\tau_t$ , тем выше скорость переходного процесса и характеристика быстрее достигает установившегося значения. В системах управления гальвосканером необходимо иметь предельно малые значения запаздывания по времени, поэтому в электродвигателях гальвосканера механическая постоянная времени должна быть по возможности небольшой. Для двигателей с большой механической постоянной времени применяемый усилитель должен иметь большой коэффициент усиления по току или напряжению. При малой механической постоянной времени двигателя необходимо

снижать коэффициент усиления усилителя, что повышает стабильность работы системы и уменьшает потери мощности.

## 1.2. Сканирующее зеркало

В сканирующем зеркале особое внимание должно быть уделено отражательной способности, балансировке, термической и динамической деформации, монтажу. Основное требование к сканирующему зеркалу – минимальная масса при минимальном моменте инерции. Еще необходимо решить три проблемы работоспособности, связанные с конструкцией и установкой зеркал – юстировка, крепление зеркал и зажим/монтаж зеркал.

Ускоряющие моменты, передаваемые сканирующему зеркалу, могут вызывать значительные искажения поверхности зеркала. Для грубой оценки деформаций, вызываемых ускоряющими моментами, имеется приближительная формула [9]:

$$\delta = 0,0055\rho\varepsilon S^5 / (Eh^2),$$

где  $\delta$  – максимальное отклонение зеркала от исходной формы;  $S$ ,  $h$  – ширина и толщина зеркала;  $\varepsilon$  – угловое ускорение;  $E$ ,  $\rho$  – модуль Юнга и плотность материала зеркала.

Когда сканирующее зеркало подвергается воздействию излучения, значительная часть излучения, которое поглощает отражающая поверхность, переносится в виде тепла к задней поверхности зеркала. Изгиб зеркальной пластины  $\delta_n$  шириной  $S$  при воздействии на нее равномерного теплового потока  $q_T$  в предположении линейного распределения температуры по толщине зеркала оценивается по формуле:

$$\delta_n = \beta q_T S^2 / (2\lambda),$$

где  $\beta$ ,  $\lambda$  – коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) и коэффициент теплопроводности материала зеркала.

Расчет распределения температуры по толщине зеркала (координата  $x$ ) для нестационарной одномерной задачи нагрева зеркала в предположении неограниченной пластины [15] проводится по формуле:

$$T(t, x) = \frac{q_r \left[ a \frac{t}{\delta} - \frac{(\delta^2 - 3x^2)}{6\delta} + \delta \sum_n (-1)^{n+1} \frac{2 \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \exp(-\mu_n^2 Fo)}{\mu_n^2} \right]}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – толщина зеркала;  $t$  – время;  $\mu_n = \pi n$  – корни характеристического уравнения,  $n = 1, 2, \dots, \infty$ ,  $Fo = at/\delta^2$  – число Фурье;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала зеркала. Расчет изгиба всей поверхности зеркала оценивался непосредственно интегрированием распределения температуры (4) по толщине зеркала:

$$\int_{-0,5\delta}^{0,5\delta} \beta ET(t, x) \frac{x A}{1 - \nu} dx,$$

где  $A = (D_{\text{пр}}/2)^2 / D_{\text{хз}}$ ;  $D_{\text{хз}} = E\delta^3 / [12(1 - \nu^2)]$  – жесткость зеркала;  $D_{\text{пр}}$  – приведенный диаметр зеркала;  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала зеркала.

Выбор материала подложки зеркала зависит от конкретного рабочего применения гальвосканера и должен удовлетворять всем требованиям к работоспособности, рассмотренным ранее. В работе [9] приведены свойства материалов, подходящих для зеркальной подложки. Показателем прочностных качеств конструкции зеркала является как можно большее отношение  $E/\rho$ , тепловых, как можно меньшее отношение  $\beta/\lambda$ .

Нами спроектирована конструкция сканирующих зеркал для конкретного применения – осуществления аддитивного процесса селективного лазерного плавления металлических порошков. Зеркала в виде прямоугольников со срезанными вершинами шириной 32 мм (высота: X-зеркало – 26 мм, Y-зеркало – 50 мм) и толщиной подложки 4 мм предполагается изготовить из монокристаллического кремния. Их расчетные характеристики: а) вес: X-зеркала 7,2 г (в сборе с оправкой 11 г), Y-зеркала 13,5 г (в сборе с оправкой 22 г); б) момент инерции: X-зеркала – 3,92 г см<sup>2</sup>, Y-зеркала – 8,45 г см<sup>2</sup>. Зеркала клеиваются в алюминиевые оправки по трем поверхностям (торец, задняя и передняя поверхности) эпоксидным клеем. На зеркала наносится отражающее покрытие, обеспечивающее коэффициент зер-

кального отражения  $R \geq 99,6\%$  на длине волны лазера, и защитное покрытие, обеспечивающее защиту от воздействия атмосферы и протирки. Держатели с зеркалами с помощью прихватов крепятся к валу ротора электромотора гальвосканера винтами.

### 1.3. Датчик угла поворота

Датчик угла поворота (ДУП) – устройство, предназначенное для преобразования угла поворота вращающегося объекта (вала ротора) в цифровые или аналоговые сигналы, позволяющие определить угол его поворота. ДУП подразделяются: по способу выдачи информации на накапливающие (инкрементные) и абсолютные (позиционные); по принципу действия на оптические, резистивные, магнитные, индуктивные, механические; по допустимому углу поворота вала на ДУП с ограниченным диапазоном работы и ДУПы с неограниченным диапазоном работы. При проектировании был выбран абсолютный оптический ДУП.

Разработанный ДУП – оптический абсолютный датчик угла поворота (энкодер), который не требует привязки системы отсчета к какому-либо нулевому положению. Датчик имеет жестко закреплённый на валу и изготовленный из легкого материала непрозрачный диск-шторку в форме бабочки. При работе поток света от светодиода попадает на диск, который частично перекрывает доступ света к фотодиоду. Генерируемый светодиодом сигнал пропорционален углу поворота вала ротора электродвигателя.

Разработанный ДУП гальвосканера содержит в себе четыре фотодиода. При этом возможны два режима их работы – фотодиодный и фотогальванический. В фотогальваническом режиме разделение электронов и дырок в  $p$ - и  $n$ -области под воздействием квантов излучения приводит к образованию заряда и электродвижущей силы (ЭДС). В фотодиод-

ном режиме при воздействии квантов излучения в базе происходит генерация свободных носителей, которые устремляются к границе  $p$ - $n$ -перехода, что приводит к возникновению обратной проводимости и, соответственно, протеканию тока. Быстродействие фотодиода определяется скоростью разделения носителей полем  $p$ - $n$ -перехода и ёмкостью  $p$ - $n$ -перехода. Соответственно, для повышения быстродействия следует применять фотодиодный режим. Однако, в данном случае требуется приложение к фотодиоду постоянного напряжения смещения, которое в свою очередь не должно иметь ни дрейфа, ни шума.

Также возможны различные схемы последующей обработки индивидуальных сигналов фотодиодов. В частности, возможно усиление каждого сигнала по отдельности или попарно. Поскольку в ДУП фотодиоды перекрываются шторкой попарно, то нет необходимости обрабатывать их сигналы по отдельности. В связи с этим соответствующие пары фотодиодов соединены параллельно.

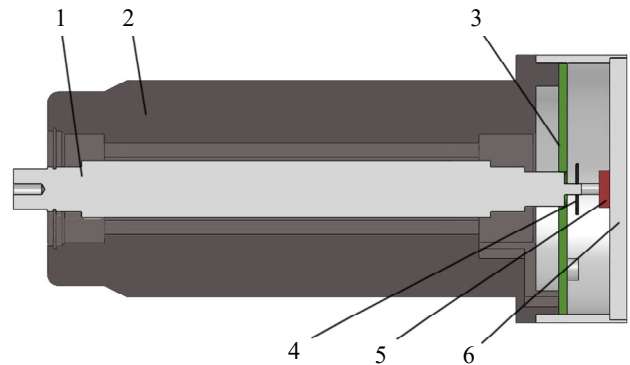
Применяемый в гальвомоторах датчик угла поворота требует стабильной подсветки фотодиодов. Дрейф интенсивности светового потока в конечном итоге приводит к дрейфу положения вала гальвосканера. Так как на дрейф положения вала гальвосканера наложены жесткие ограничения, то возникает задача минимизации дрейфа светового потока подсветки фотодиодов. Подсветка фотодиодов реализована с помощью светодиодов. Световой поток светодиода зависит как от тока, протекающего через него, так и от температуры кристалла светодиода. Для высокоточной стабилизации тока светодиодов подсветки датчика угла поворота применена схема стабилизатора тока на прецизионном операционном усилителе и полевом транзисторе. Применение внешнего полевого транзистора обусловлено в первую очередь отделением источника нагрева от операционного усилителя с целью минимизации температурного дрейфа последнего, а также как метод увеличения выходной мощности стабилизатора в целом.

Температура кристаллов светодиодов датчика угла поворота также должна быть стабилизирована как можно более точно на определенном уровне. Для этого в датчике угла поворота применяются светодиоды в метал-

лических корпусах, в которых кристаллы расположены на задней металлической стенке корпуса, непосредственно контактирующей с поверхностью теплоотвода.

#### 1.4. Реализация гальваносканера для СЛП

Разработанная конструкция опытного образца гальвомотора представлена на рисунке. Ротор в сборе 1 содержит в центральной части NdFeB магнит, который клеится эпоксидным клеем в левую и правую части вала ротора. Вал устанавливается в статор из нержавеющей стали на двух радиально-упорных шарикоподшипниках 1106098, посаженных на вал с натягом. Обмотка статора выполнена из медного провода в лаковой изоляции диаметром 0,3 мм, количество витков  $N = 75$ . Сопротивление обмотки статора  $R_{об} = 2,5$  Ом, индуктивность  $L_{об} = 550$  мкГн.



**Гальвомотор:** 1 – ротор в сборе; 2 – статор; 3 – плата с фотодиодами; 4 – шторка; 5 – светодиод; 6 – крышка (сканирующее зеркало не показано)

На правой части вала смонтирован оптический датчик угла поворота ротора. Разрешение ДУП на угле поворота  $\pm 20^\circ$  составляло 16 бит, а на полном обороте – в 9 раз выше, т. е. более 19 бит. В конструкции использован постоянный магнит из сплава неодима, бора и железа NdFeB (встречающиеся названия – нежебор или фенебор). Паспортные данные используемого в опытном образце гальвомотора магнита [16]: остаточная индукция  $B_r = 1,17$  Тл, коэрцитивная сила по индукции  $H_{св} \geq 868$  кА м<sup>-1</sup>, коэрцитивная сила по намагниченности  $H_{см} = 955$  кА м<sup>-1</sup>, максимальная удельная магнитная энергия  $(BH)_{\max} \geq 263$  кДж м<sup>-3</sup>, рабочая температура  $< 90$  °С.

Оценки крутящего момента разработанного гальвомотора по формулам, приведенным выше, для максимального среднеквадратичного тока  $I_{ср} = 5$  А дают значения  $M_{ср} = 0,188$  Н м (постоянная крутящего момента  $K_T = 0,038$  Н м А<sup>-1</sup>), для пикового тока  $I_{п} = 15$  А –  $M_{п} = 0,564$  Н м.

Резонансная частота, оцененная по формуле (2), для нашего конкретного случая  $\omega_p = \sqrt{E/[2(1+\nu)\rho l_b^2]} = 3,47 \times 10^4$  рад с<sup>-1</sup> =  $0,552 \times 10^4$  об с<sup>-1</sup>.

Применительно к нашему гальвосканеру при учете инерции вала и зеркала время реак-

ции на скачок в один градус оцененное по формуле (3) составит  $t = 0,495$  мс.

Расчетные моменты инерции вала с дополнительными элементами для разработанной конструкции составляют: вал –  $8,3 \times 10^{-7}$  кг м<sup>2</sup> (8,3 г см<sup>2</sup>), X-зеркала –  $5,22 \times 10^{-7}$  кг м<sup>2</sup> (5,22 г см<sup>2</sup>), Y-зеркала –  $14,1 \times 10^{-7}$  кг м<sup>2</sup> (14,1 г см<sup>2</sup>), вал + X-зеркало + ДУП –  $15,4 \times 10^{-7}$  кг м<sup>2</sup> (15,4 г см<sup>2</sup>), вал + Y-зеркало + ДУП –  $26,3 \times 10^{-7}$  кг м<sup>2</sup> (26,3 г см<sup>2</sup>).

В таблице приведены данные для современных гальванометрических сканеров, близких к проектируемому по исполнению.

Таблица

**Сравнительные характеристики современных гальванометрических сканеров с подвижным магнитом (составлено по спецификациям производителей)**

| Модель   | 6240Н <sup>[4]</sup>    | 6250Н <sup>[4]</sup>     | QS-30 <sup>[5]</sup>    | dynAXIS 3L <sup>[6]</sup> | Superscan V-15 <sup>[7]</sup> | SG8216 <sup>[8]</sup> | Наша разработка         |
|--|-------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Рекомендуемый размер апертуры, мм                  | 12–25                   | 25–75                    |                         | 20–30                     | 15                            | 16                    | 15–20                   |
| Максимальный угол сканирования, град               | 40                      | 40                       | ±22,5                   | ±19                       | ±20                           | ±15                   | ±22,8                   |
| Инерция ротора, г см <sup>2</sup> , ±10 %          | 2,4                     | 15,6                     | 5,1                     | 5,1                       |                               |                       | 8,3                     |
| Постоянная крутящего момента, г см А <sup>-1</sup> | 204                     | 722                      | 285                     | 245                       |                               |                       | 147                     |
| Максимальная температура ротора, °С                | 110                     | 110                      |                         |                           |                               |                       | 110                     |
| Термосопротивление ротора к корпусу, °С/ Вт        | 0,62                    | 0,35                     |                         |                           |                               |                       | –                       |
| Сопротивление обмотки, Ом, ±10 %                   | 1,03                    | 1,69                     | 5,8                     | 0,85                      |                               |                       | 2,5                     |
| Индуктивность обмотки, мкГн, ±10 %                 | 350                     | 1030                     | 450                     | 300                       |                               |                       | 550                     |
| Напряжение обратной ЭДС, мкВ/(°С/с), ±10 %         | 346                     | 1220                     |                         |                           |                               |                       | –                       |
| Действующее значение тока, А                       | 8,2                     | 7,1                      |                         | 5                         | 2                             | 3,5                   | 5                       |
| Пиковое значение тока, А                           | 25                      | 20                       |                         | 15                        | 5                             | 20                    | 15                      |
| Время отклика на малый угол, мкс                   | 300<br>15 мм<br>Y-зерк. | 3000<br>50 мм<br>Y-зерк. | 650<br>30 мм<br>X-зерк. | 700                       | 500                           | 500                   | 170<br>32 мм<br>X-зерк. |
| Датчик:<br>Линейность                              | 99,9 %<br>для 20°       | 99,9 %<br>для 20°        | >99,9 %                 | >99,6 %                   |                               | 99,9 %                | 99,9 %                  |
| Разрешение, мкрад                                  |                         |                          |                         |                           | 12                            | 12                    | 8,4                     |
| Дрейф усиления, ppm/°С                             | 50                      | 50                       |                         | <40                       | 8                             | <40                   | –                       |
| Дрейф нуля, мкрад/°С                               | 15                      | 15                       | 15                      | <15                       | 15                            | <15                   | 12,7                    |
| Краткосрочная воспроизводимость, мкрад             | 8                       | 8                        | 15                      | 1                         | 0,4                           | 8                     | –                       |
| Вес, г   | 356                     | 590                      |                         | ~400                      |                               | 280                   | 440                     |



## 2. Управление гальвосканером

Управление электродвигателем гальвосканера происходит через плату управления, которая получает сигнал о текущем положении сканирующего зеркала от ДУП. Питание гальвомоторов осуществляется через платы управления от внешнего блока питания.

Архитектура драйвера гальвосканера должна быть основана на предъявляемых к нему требованиях, а также иметь некоторый потенциал для реализации дополнительных функций и модернизации. В этой связи при разработке была использована гибридная аналогово-цифровая архитектура. В основу драйвера гальвосканера положен DSP (Digital Signal Processor – цифровой сигнальный процессор). Он представляет собой цифровую часть драйвера гальвосканера. Изменяя его программное обеспечение, можно до некоторой степени изменять работу всего драйвера. Остальная часть драйвера является аналоговой и осуществляет функции питания, преобразования, несложной обработки и усиления сигналов.

Силовая часть драйвера гальвосканера состоит из линейного усилителя сигналов управления электродвигателем гальвосканера. В качестве усилителя сигнала управления обмотками гальвомотора применяется линейный усилитель звуковой частоты.

Цепи питания и опорных напряжений драйвера гальвомотора представлены несколькими биполярными напряжениями и двумя опорными напряжениями. Каждая из цепей питания имеет в своем составе П-образный LC-фильтр, что исключает прохождение возмущений в обе стороны. Основные цепи питания DSP реализованы с помощью импульсных регуляторов, в то время как питание аналоговой части реализовано с помощью линейных регуляторов. Это позволяет снизить как тепловыделение (на регуляторах питания DSP, через которые проходит относительно высокий ток), так и вносимые шумы (на регуляторах аналоговой части, через которые проходит относительно малый ток). Схемы формирования опорных напряжений структурно состоят из прецизионных маломощных источников опорного напряжения и усилителей мощности на операционных усилителях и внешних биполярных транзисторах. Такое

решение позволило свести к минимуму тепловыделение на источниках опорного напряжения и операционных усилителях, тем самым минимизировав температурный дрейф.

Основным вычислительным элементом драйвера гальвомотора является DSP. В него задачи входят:

- оцифровка сигналов выхода ДУП;
- прием данных по интерфейсу XY2-100 от блока сопряжения сканирующей головки;
- вычисление управляющих воздействий для электродвигателя гальвосканера;
- формирование аналогового сигнала управления для усилителя мощности электродвигателя гальвосканера.

Для сопряжения физических сигналов интерфейса XY2-100 и DSP применяется счетверенный дифференциальный приемник. Внешняя обвязка этой микросхемы обеспечивает корректное сопряжение дифференциальной линии, а также отсутствие ложных переключений в случаях, когда линия не подключена. В качестве элемента декодирования двоичных последовательностей XY2-100 в DSP используется многоканальный последовательный порт McBSP.

Управление обмоткой статора электродвигателя гальвосканера заключается в реализации регулятора второго порядка, имеющего один нулевой полюс. Сам гальвосканер как объект управления представляет собой неустойчивый объект 3-го порядка. Параметры регулятора подбираются по логарифмической амплитудно-частотной характеристике гальвосканера таким образом, чтобы в замкнутом состоянии система была устойчива и имела требуемые показатели регулирования.

## 3. Испытания гальвосканера

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем гальвосканера, определялся экспериментально путем уравнивания его моментом противоположного знака, создаваемым грузом, расположенным на определенном радиусе от оси вала ротора двигателя. Получена постоянная крутящего момента  $K_T = 0,0147 \text{ Н м А}^{-1}$ , которая значительно ниже оценочных значений, получаемых с помощью формул (1) и (3). Гальвосканеры по осям  $X$  и  $Y$  испытывались в составе сканирующей голов-

ки. Ниже приведены данные, которые характеризуют работоспособность непосредственно гальвосканера (в скобках указаны требования технического задания):

- угол сканирования по каждой оси –  $\pm 22,8^\circ$  ( $\pm 20^\circ$ );
- разрешение – 8,4 мкрад по оси  $X$ , 11,2 мкрад по  $Y$  (не более 12 мкрад);
- позиционная повторяемость – угловое смещение 3,1 мкрад (не более 8 мкрад);
- максимальная скорость позиционирования – 22,5 м/с (10 м/с);
- время выполнения шага сканирования (1 % от амплитуды) – 0,17 мс (не более 1 мс);
- долговременный дрейф в течение более 8 часов – 0,17 мрад (не более 0,5 мрад);
- максимальное температурное смещение нуля – 12,7 мкрад  $K^{-1}$  (не более 15 мкрад  $K^{-1}$ ).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что все заданные в техническом задании характеристики гальвосканера превышены.

### Заключение

Спроектирован, изготовлен и испытан гальвосканер, используемый в сканирующих головках для осуществления аддитивного процесса селективного лазерного плавления металлических порошков. Данная разработка является одной из пионерских импортозамещающих разработок в указанной области применения в Российской Федерации.

Испытания показали, что разработанная конструкция превосходит практически все показатели работоспособности, заложенные при проектировании. Достигнутые рабочие характеристики конкурентоспособны с характеристиками подобных гальванометрических сканеров иностранных фирм. В дальнейшем планируется работа по созданию линейки

гальвосканеров для различных апертур входного лазерного пучка и различных применений.

Работа выполнена в рамках договора  
от 26.12.2019 № 793/121-Д между  
ООО «РусАТ» и ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»  
на выполнение научно-исследовательской  
и опытно-конструкторской работы по теме:  
«Создание 2-х осевого сканатора  
для селективного лазерного плавления».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов М. В., Земляков Е. В., Бабкин К. Д. // Фотоника. 2016. № 6 (60). С. 14.
2. Нестерук И. Н. // Фотоника. 2007. № 3. С. 10.
3. Aylward R. Advance & Technologies of Galvanometer-based Optical Scanners. // SPIE. 1999. Vol. 3787.
4. <https://www.cambridgetechnology.com/>
5. <https://nutfieldtech.com/>
6. <https://www.scanlab.de/>
7. <https://www.raylase.de/>
8. <http://sino-galvo.com/>
9. Handbook of Optical and Laser Scanning / 2<sup>nd</sup> Ed. Edited by Gerald F. Marshall. – Marcel Dekker, CRC Press. 2012.
10. Paul R. Yoder Jr. Opto-Mechanical Systems Design / Third Edition. – Taylor & Francis Group, LLC. 2006.
11. <http://ferrite.ru/products/magnets/ndfeb/> (дата обращения: 07.09.2022).
12. Выскуб В. Г., Сыряжкин В. И., Шидловский В. С. Устройства и системы автоматического управления высокой точности. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2009.
13. <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/dcmotor/> (дата обращения: 07.09.2022).
14. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
15. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
16. [www.eclipsemagnetics.com/](http://www.eclipsemagnetics.com/) (дата обращения: 07.09.2022).

## Design, manufacture and testing of a galvanometer scanner

S. N. Lepeshkin, V. V. Molchanov, Yu. I. Shanin, and I. S. Sharapov

JSC "Scientific Research Institute Research and Production Association "LUCH"  
24 Zheleznodorozhnaya st., Podolsk, 142103, Russia  
E-mail: ShaninYuI@sialuch.ru

Received September 16, 2022

*A galvanometric scanner (galvoscaner) is a device for turning a laser beam through a certain angle. The article considers both approaches to designing elements of a galvo scanner (a DC motor, a scanning mirror, a rotation angle sensor, a galvo scanner control driver board), and the results of testing its performance after manufacturing. The mirror and sensor were driven by a brushless DC torque motor with a rotor made of a permanent strong magnet made of neodymium, boron and iron – NdFeB. The mirrors were made of single-crystal silicon and designed for an input laser beam aperture of 15 mm. The mirrors have a reflective coating that provides a specular reflection coefficient  $R \geq 99.6\%$  for a laser wavelength  $\lambda = 1080 \pm 1$  nm. The design of an optical absolute rotation angle sensor (encoder) using LEDs and photodiodes has been developed. When developing the control board (driver) for the galvo scanner, a hybrid analog-digital architecture was used, the digital part of the driver is a digital signal processor.*

*Galvoscaners were tested for performance according to the developed program and methodology on a special stand and equipment made for testing. As a result of testing, the main design characteristics (scan angles, scan pitch, scan speed and positional repeatability, temperature zero offset and long-term drift) were exceeded.*

*Keywords:* galvanometric scanner, galvoscaner, galvo motor, deflector, scanning mirror, rotation angle sensor.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-490-500

### REFERENCES

1. M. V. Kuznetsov, E. V. Zemlyakov, and K. D. Babkin, *Photonics*, No. 6 (60), 14 (2016) [in Russian].
2. I. N. Nesteruk, *Photonics*, No. 3, 10 (2007) [in Russian].
3. R. Aylward, *Advance & Technologies of Galvanometer-based Optical Scanners*. SPIE 3787 (1999).
4. <https://www.cambridgetechnology.com/>
5. <https://nutfieldtech.com/>
6. <https://www.scanlab.de/>
7. <https://www.raylase.de/>
8. <http://sino-galvo.com/>
9. *Handbook of Optical and Laser Scanning*. 2<sup>nd</sup> Ed. Edited by Gerald F. Marshall. (Marcel Dekker, CRC Press, 2012).
10. R. Paul and Jr. Yoder, *Opto-Mechanical Systems Design*. Third Edition. (Taylor & Francis Group, LLC. 2006).
11. <http://ferrite.ru/products/magnets/ndfeb/> (accessed 07.09.2022).
12. V. G. Vyskub, V. I. Syryamkin, and V. S. Shidlovsky, *Devices and systems of automatic control of high precision* (Publishing House of Tomsk State University, Tomsk, 2009) [in Russian].
13. <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/dcmotor/> (accessed 07.09.2022).
14. T. Kenjo and S. Nagamori, *Permanent-magnet and brushless DC motors*. (Oxford: Clarendon Press, 1985; Energoatomizdat, Moscow, 1989).
15. A. V. Lykov, *Theory of thermal conductivity*. (Higher school, Moscow, 1967) [in Russian].
16. [www.eclipsemagnetics.com/](http://www.eclipsemagnetics.com/) (accessed 07.09.2022).