

Б. В. ЕФИМОВ, В. Б. САХОВ
(Ленинград)

БЕСКОНТАКТНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛАМПОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С МАГНИТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Для преобразования линейных и угловых перемещений в электрический сигнал применяются электронные ламповые преобразователи с механически управляемыми электродами (механотроны) [1].

Осуществление бесконтактного преобразования перемещений возможно лишь при полном исключении непосредственной механической связи электронной лампы с перемещающимся объектом. Таким бесконтактным преобразователем является электронный ламповый преобразователь угловых перемещений, управляемый внешним магнитным полем [2].

Принцип работы этого преобразователя основан на явлении изменения траектории электронов в лампе под действием внешнего магнитного поля. Управление электронным потоком лампы может быть осуществлено либо изменением ориентации вектора напряженности магнитного поля относительно вектора скорости электронов, либо изменением величины напряженности действующего магнитного поля. Последний метод в настоящей статье не рассматривается.

При управлении электронным потоком изменением ориентации магнитного поля возможна такая начальная ориентация магнитного и электрического полей, при которой траектория электронов не претерпевает изменений и выходной сигнал отсутствует.

На рис. 1, а показано расположение электродов простейшей магнитоуправляемой лампы (двойной диод с общим катодом) (A_1 и A_2 — аноды, K — катод, \vec{H} и \vec{E} — векторы напряженности магнитного и электрического полей). При параллельной ориентации однородного электрического и магнитного полей магнитное поле не влияет на траекторию электронов.

Уравнения траектории электронов при пренебрежении начальными скоростями и объемным зарядом в этом случае имеют вид:

$$x = x_n; \quad y = y_n; \quad z = \frac{eE}{2m} t^2,$$

где e и m — заряд и масса электрона; t — время.

При заданной ориентации полей возможно использовать два метода управления электронным потоком в лампе: 1) поворотом магнитного

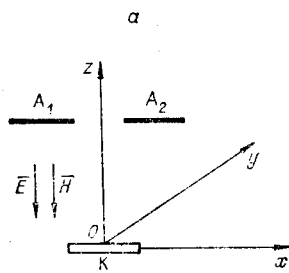


Рис. 1.

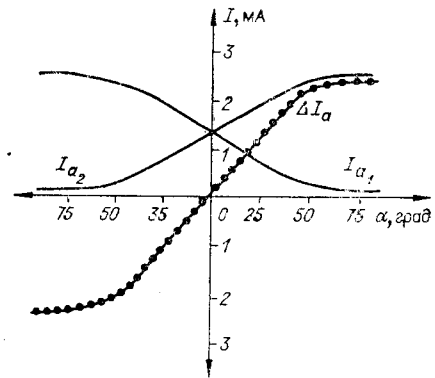
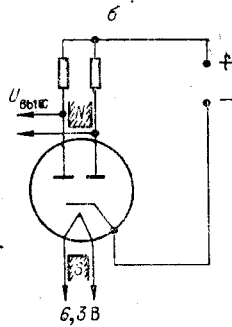


Рис. 2.

поля в плоскости, перпендикулярной к плоскости анодов (относительно оси $x - x$ в плоскости $yo2$); 2) поворотом магнитного поля относительно оси катода (относительно оси $y - y$ в плоскости $xo2$).

Для первого метода управления электронным потоком, т. е. при повороте магнитного поля относительно оси $x - x$ против часовой стрелки на угол α , уравнения траектории электронов в системе координат $oxyz$ могут быть представлены в следующем виде:

$$x = \frac{\gamma \sin \alpha}{\omega^2} (\omega t - \sin \omega t); \quad (1)$$

$$y = \frac{\gamma \sin 2\alpha}{2\omega^2} \left(1 - \cos \omega t - \frac{\omega^2 t^2}{2} \right); \quad (2)$$

$$z = \frac{\gamma t^2}{2} \cos^2 \alpha + \frac{\gamma \sin^2 \alpha}{\omega^2} (1 - \cos \omega t), \quad (3)$$

где

$$\gamma = e E/m; \quad \omega = eH/m$$

При изменении направления вращения магнитного поля полярность отклонения электрона по осям y и x меняется на обратную.

Так как траектория электрона в направлении оси z ограничена межэлектродным расстоянием D катод — плоскость анодов, из уравнения (3) можно найти связь между углом поворота магнитного поля и временем пролета электрона

$$\alpha = \arcsin \sqrt{\frac{D - \frac{\gamma t^2}{2}}{\gamma \left(\frac{1 - \cos \omega t}{\omega^2} - \frac{t^2}{2} \right)}}$$

Как показывает расчет, для значений начального магнитного поля

$$H \leq \frac{0,1}{D} \sqrt{\frac{2mU}{e}},$$

где U — анодное напряжение, время пролета электрона при повороте магнитного поля изменяется незначительно.

Следовательно, для этих значений магнитного поля смещение электрона (x) в плоскости анодов является синусоидальной функцией угла поворота с периодом 360° .

Для малых углов поворота уравнения траектории электрона могут быть значительно упрощены. Так, пренебрегая членами, содержащими $\sin^2 \alpha$, и считая $\cos \alpha = 1$, имеем:

$$x = \frac{mE}{eH^2} \sin \alpha \left[H \sqrt{\frac{2De}{Em}} - \sin \left(H \sqrt{\frac{2De}{Em}} \right) \right];$$

$$S' = \frac{mE}{eH^2} \sin 2\alpha \left[H \sqrt{\frac{2De}{Em}} - \sin \left(H \sqrt{\frac{2De}{Em}} \right) \right],$$

из которого видно, что чувствительность при заданном значении E и H не зависит от угла поворота. Анализ этого выражения показывает, что существует оптимальное значение напряженности магнитного поля

$$H_{\text{opt}} = \frac{2,2}{D} \sqrt{\frac{mU}{e}}, \quad (4)$$

соответствующее максимальной чувствительности для этого метода управления

$$S_{\text{max}} \approx 0,63D. \quad (5)$$

При управлении электронным потоком поворотом магнитного поля относительно оси катода, т. е. оси $y - y$ в плоскости xOz , движение электрона может быть представлено следующими выражениями:

$$x_1 = \frac{\gamma \sin 2\alpha}{2\omega^2} \left(\frac{\omega^2 t^2}{2} + \cos \omega t - 1 \right);$$

$$y_1 = \frac{\gamma \sin 2\alpha}{\omega^2} (\omega t - \sin \omega t).$$

Учитывая аналогичные соображения относительно времени пролета электрона, можно считать, что смещение электрона в плоскости анодов в направлении оси $x - x$ является синусоидальной функцией угла поворота с периодом в 180° .

Для малых углов поворота при аналогичных допущениях имеем

$$x_1 = \frac{mE}{2eH^2} \sin 2\alpha \left[\frac{DeH^2}{mE} + \cos \left(H \sqrt{\frac{2De}{Em}} \right) - 1 \right], \quad (6)$$

а чувствительность к повороту магнитного поля будет определяться выражением

$$S_1 = \frac{dx_1}{d\alpha} = \frac{mE}{eH^2} \cos 2\alpha \left[\frac{DeH^2}{mE} + \cos \left(H \sqrt{\frac{2De}{mE}} \right) - 1 \right]. \quad (7)$$

Считая $\cos 2\alpha = 1$, будем иметь чувствительность к углу поворота постоянной с точностью до 1% в пределах $\pm 8^\circ$.

Как следует из выражения (7), чувствительность зависит от величины магнитного поля. Однако, начиная со значений напряженности магнитного поля

$$H = 4,4 \frac{1}{D} \sqrt{\frac{mU}{e}}, \quad (8)$$

чувствительность преобразователя при управлении электронным потоком поворотом магнитного поля относительно оси катода практически не зависит от величины магнитного поля и равна $S_1 = D$. Это обстоя-

тельство способствует получению стабильной чувствительности при случайном изменении начальной напряженности магнитного поля.

Экспериментальные исследования электронного лампового преобразователя проводились на магнитоуправляемых лампах, оформленных в стеклянном баллоне от лампы 6Н16Б (длина 35 мм, диаметр 10 мм). Схематическое расположение электродов в лампе, а также схема включения преобразователя даны на рис. 1, б. В преобразователе использовался катод также от лампы 6Н16Б (напряжение накала 6,3 В, $I_f = 0,2$ А) с вертикальным расположением по оси лампы. В стороне, противоположной анодам относительно катода, был установлен экран.

С целью уменьшения реактивных сил между магнитом и лампой ее электроды были выполнены из немагнитных материалов (сплав титана). Оксидный катод, выполненный на никелевом основании, при разогреве теряет свои ферромагнитные свойства. В качестве источника магнитного поля использовался электромагнит.

На рис. 2 представлена зависимость анодных токов, а также их разности (величина тока в диагонали мостовой схемы ΔI_a) от величины угла поворота источника магнитного поля относительно оси $x - x$, при $U_a = 100$ В, и $H = 110$ Э. За нулевое значение угла принято положение магнита, при котором анодные токи равны. Аналогичные зависимости получены и для других экземпляров ламп. Среднее значение чувствительности по току составляет 40 мкА/град при длине линейного участка характеристики $\pm (50 \div 60^\circ)$. При управлении электронным потоком поворотом магнитного поля относительно оси $y - y$ чувствительность по току достигает 0,1 мА/град при длине линейного участка характеристики $\pm 12^\circ$.

Как показали исследования, диапазон линейности и крутизна при данной конструкции лампы могут быть изменены соответствующим изменением напряженности начального магнитного поля.

Увеличение чувствительности по напряжению может быть достигнуто увеличением плотности тока на анодах при одновременном увеличении внутреннего сопротивления лампы, что может быть осуществлено применением в лампе элементов электронной оптики.

Схематическое расположение электродов в лампе с повышенной чувствительностью по напряжению представлено на рис. 3. Перед катодом К расположена диафрагма Д с прямоугольной щелью, находящаяся под потенциалом катода. В зазоре между анодами A_1 и A_2 расположена пластина С, находящаяся под потенциалом катода и выполняющая роль антидинакторной сетки.

Наличие однородного магнитного поля, расположенного параллельно электрическому, способствует фокусировке электронов в плоскости анодов. Как показал расчет, значения напряженности магнитного поля, соответствующего оптимальной фокусировке и максимальной чувствительности, практически совпадают.

Для таких образцов ламп при управлении электронным потоком поворотом магнитного поля относительно оси катода была получена чувствительность по напряжению ($U_a = 150$ В, $H = 1000$ Э) 30—40 В/град при диапазоне линейности характеристики в пределах $\pm (3 \div 5^\circ)$.

Величину линейного участка и крутизну характеристики для одной и той же лампы можно регулировать в довольно широких пределах изменением напряженности магнитного и электрического полей.

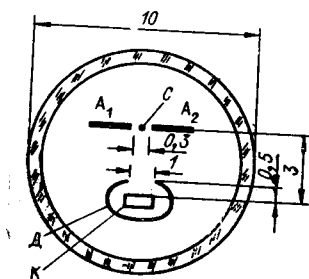


Рис. 3.

Проверка стабильности нулевого сигнала во времени при стабилизированных источниках питания показала, что выход преобразователя перемещений на устойчивый режим наблюдается по истечении 1—2 мин, после чего дрейф нулевого сигнала, выраженный в единицах угла, не превышает долей угловой минуты в течение нескольких часов. Более продолжительные испытания на стабильность проводились в течение 90 дней. За это время дрейф нулевого сигнала от включения к включению и во время работы не превышал $\pm 2'$.

Параметры магнитоуправляемой лампы не критичны к межэлектродным расстояниям. Несимметрия анодных токов порядка 1:7 в отсутствие магнитного поля из-за неточности сборки лампы существенно не влияет на выходные параметры и может быть устранена соответствующей начальной ориентацией магнитного поля.

Практически уверенно фиксировался поворот лампы в $0,5''$. Достигнутый порог чувствительности может быть уменьшен при подавлении помех в виде внешних паразитных магнитных полей. Изменение окружающей температуры мало влияет на параметры лампы.

Анализ методов управления электронным потоком в ламповом преобразователе изменением ориентации вектора напряженности магнитного поля относительно вектора скорости электронов позволяет разграничить области применения этих методов и дать определенные рекомендации по их целесообразному применению.

Для измерения малых угловых перемещений, а также при использовании магнитоуправляемой лампы в качестве нулевого указателя в схемах уравнивания наиболее целесообразно применение метода управления электронным потоком поворотом магнитного поля относительно оси катода. Этот метод управления обеспечивает наибольшую крутизну характеристики и минимальные габариты магнитной системы.

Метод управления электронным потоком поворотом магнитного поля в плоскости, перпендикулярной к плоскости анодов, целесообразно применять при необходимости получения линейной характеристики в широких пределах до $\pm (50 \div 60^\circ)$. В этом случае магнитная система должна иметь сравнительно большой зазор (около 30 мм), но так как при этом методе управления рабочая величина напряженности магнитного поля значительно меньше по сравнению с предыдущим методом, создание магнитной системы небольших габаритов не представляет существенных затруднений.

Применение электронных ламповых преобразователей с магнитным управлением в качестве измерителя перемещения позволило разработать ряд конструкций автоматических вискозиметров и дилатометров, отличающихся высокой надежностью и точностью измерений [3—5].

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Сахов. Электронно-механические ламповые преобразователи и их использование для измерения неэлектрических величин. Л., ЛДНТП, 1961.
2. Б. В. Ефимов. Преобразователь механических перемещений в электрическую величину. Авторское свидетельство № 123261.— БИ, 1959, № 20.
3. Б. В. Ефимов, В. П. Ключев, В. Б. Сахов. Электронные ламповые преобразователи с магнитным управлением и возможности их применения в дилатометрии.— Методы измерения теплового расширения стекол и спайваемых с ними металлов. Л., «Наука», 1967.
4. В. П. Ключев, В. Б. Сахов. Измерение вязкости стекол в области размягчения при помощи автоматического вискозиметра вдавливания.— Стекло, 1967, № 2.
5. В. П. Ключев, О. В. Мазурин и В. Б. Сахов. Датчик малых перемещений и его применение в вискозиметрии и дилатометрии.— Заводская лаборатория, 1968, № 5.

*Поступила в редакцию 17 апреля 1969 г.,
окончательный вариант —
6 июля 1971 г.*