

УДК 531.76

**ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ДИНАМИЧЕСКИМ И КОНСТРУКТИВНЫМ ПАРАМЕТРАМ ДАТЧИКА УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ И СКОРОСТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СКАНЕРА ТЕПЛОВИЗОРА**

Н.П. БУСЕЛ, А.А. ОТДЕЛЬНЫЙ, А.Н. БУСЕЛ

*Белорусско-Российский университет  
пр. Мира, 43, Могилев, 212005, Беларусь**Поступила в редакцию 18 февраля 2007*

Получены теоретические оценки максимальных величин скорости вращения и ускорения вала датчика, определяющих выбор его конструкции и принципа действия.

*Ключевые слова:* датчик углового положения и скорости, развертка изображения, привод сканера тепловизора нового поколения.

**Введение**

Стремление существенно уменьшить габариты новых конструкций тепловизоров высокой чувствительности и разрешающей способности при визуализации изображения в широком поле зрения, заставляет переходить на телевизионный стандарт развертки изображения на частоте  $f=50$  Гц при КПД сканирования не менее 75%. В таких условиях время возврата зеркала сканера тепловизора в исходное положение составляет тысячные доли секунды, что накладывает жесткие ограничения на конструктивные и динамические параметры датчика углового положения и скорости вращения вала электропривода сканера, обусловленные высокими значениями угловых скоростей и ускорений.

**Динамические параметры датчика углового положения и скорости**

По известным материалам предприятия ЗАО НПФ "Оптоойл" (г. Казань) в одном из проектов тепловизора нового поколения угол обзора  $\psi_{\max}=30^\circ$ , а угол поворота вала  $\varphi_1$  [1] равен

$$\varphi_1 = \frac{\psi_{\max}}{2} = \frac{0,524}{2} = 0,262 \text{ рад.} \quad (1)$$

При частоте развертки 50 Гц и КПД 75% движение сканирующего зеркала тепловизора при оптимальном по быстродействию управлении на участке его возврата в исходное положение можно представить так, как это показано на рис. 1.

На рис. 1 обозначены:  $\epsilon$ ,  $-\epsilon$  — ускорения на участке возврата зеркала в исходное положение;  $\omega_{\text{раб}}$  — скорость вращения вала привода на рабочем участке;  $\omega_{\text{рев}}$  — скорость вращения вала при реверсе привода;  $\omega_1$  — скорость вращения вала в момент начала реверса;  $\omega_2$  — максимальная скорость вращения вала,  $\omega_3$  — скорость в начале следующего цикла сканирования;  $\omega_{\text{возвр}}$  — скорость вращения вала сканирующего электропривода при возврате в исходное положение;  $\varphi$  — угол поворота зеркала (вала).

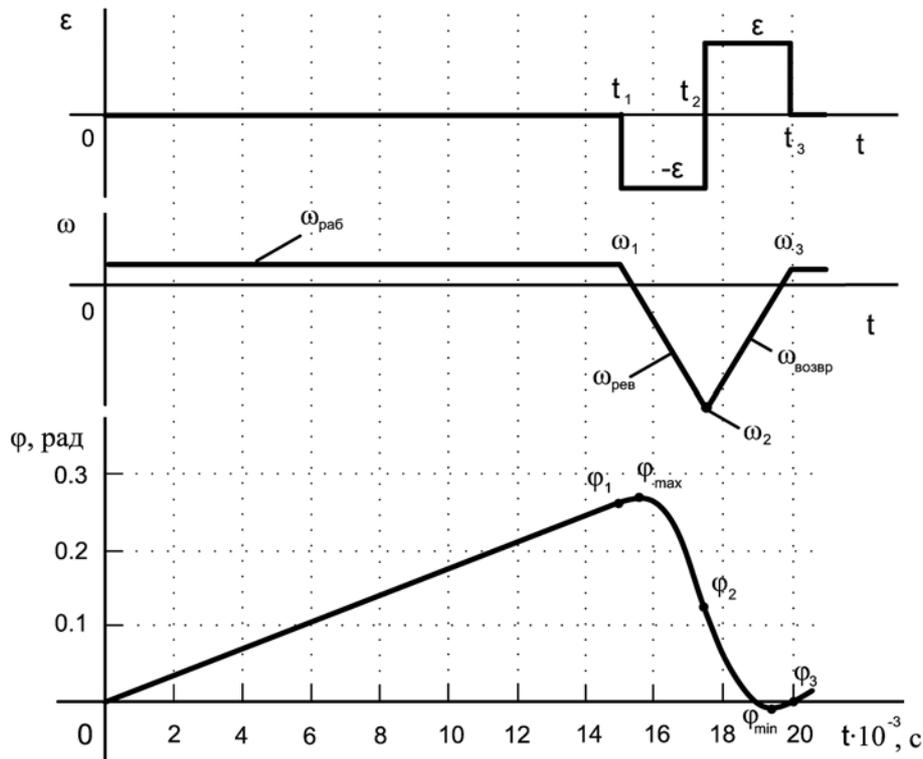


Рис. 1. Параметры движения сканирующего зеркала

Для оценки требований к кинематическим параметрам датчика углового положения и скорости вращения вала привода рассмотрим предельный случай, реализующий оптимальное по быстродействию движение сканирующего электропривода. Численное значение угловой скорости вала с учетом (1) на рабочем участке движения зеркала составляет величину

$$\omega_{раб} = \frac{\varphi_1}{t_1} = \frac{0,262}{15 \cdot 10^{-3}} = 17,4 \text{ с}^{-1}. \quad (2)$$

В идеальном случае при реверсе и разгоне привода на участке возврата зеркала в исходное состояние величины углового замедления и ускорения можно принять одинаковыми. Это позволяет определить предельные кинематические параметры привода, а именно:  $\varepsilon$ , максимальную  $\varphi_{max}$  и минимальную  $\varphi_{min}$  величины угла поворота зеркала, а также максимальную скорость вращения  $\omega_{max}$  вала, которые можно рассматривать в качестве исходных данных, определяющих выбор конструкции датчика углового положения и скорости.

При постоянном замедлении привода на участке реверса от  $t_1$  до  $t_2$ , уравнение движения имеет вид

$$\varphi = \varphi_1 + \omega_1(t - t_1) - \frac{\varepsilon(t - t_1)^2}{2}. \quad (3)$$

Рассматривая далее аналогичные уравнения на участке  $t_2-t_3$  разгона зеркала и обеспечивая возврат его в исходное положение за время  $t_3$  для нашего случая ( $t_1=0,015$ ,  $t_3=0,02$ ), найдем координаты точки 2:  $t_2=0,0175$  с,  $\varphi_2=0,131$  рад, а также

$$\varepsilon=55840 \text{ рад/с}^2 \text{ и } \omega_2=\omega_{max}=-122 \text{ с}^{-1}. \quad (4)$$

Дальнейшее исследование уравнений движения на экстремум позволяет определить максимальный и минимальный углы качания зеркала, а именно:  $\varphi_{max}=15,2^\circ$  и  $\varphi_{min}=-0,155^\circ$ . После этого приведем диапазон угла качания зеркала сканера:

$$\Delta\varphi=\varphi_{max}-\varphi_{min}=15,2+0,155=15,3^\circ. \quad (5)$$

Таким образом, датчик углового положения и скорости должен работать в диапазоне углов  $15,3^\circ$  при скоростях до  $122 \text{ с}^{-1}$  и ускорениях  $55840 \text{ рад/с}^2$ .

Далее воспользуемся рекомендациями для максимального числа импульсов  $Z$  считывания информации на рабочем участке движения зеркала и определим максимальное число  $N$  импульсов датчика углового положения вала в пределах оборота [1]:

$$N = \frac{Z}{\Delta\varphi} 360^\circ = \frac{692}{15,3} 360 = 16,3 \cdot 10^3. \quad (6)$$

Ориентируясь при этом на лучшие образцы цифровых инкрементных преобразователей углового положения с числом импульсов на оборот вала  $N > 16000$ , подчеркнем, что предельное значение скорости вращения вала таких датчиков [3] близко к полученному ранее, однако в реальном электроприводе скорости будут значительно больше. Кроме того, применение цифровых инкрементных преобразователей углового положения затруднительно по причине относительного, а не абсолютного отсчета углового перемещения. Во избежание этого недостатка, на наш взгляд, абсолютный датчик углового положения и скорости целесообразно строить на основе двухотсчетного оптоэлектронного синусно-косинусного первичного преобразователя, так называемого оптосина [5].

### Конструктивные параметры датчика углового положения и скорости

Переходя к конструктивным параметрам оптосина, в качестве исходных данных выберем момент инерции  $J$ , угловую погрешность  $\Delta\varphi$ , определяющую его разрешающую способность и быстродействие.

Для оценки допустимой величины момента инерции оптосина зададимся долей мощности  $P$  сканирующего электропривода, затрачиваемой на возврат его в исходное положение. Для этого воспользуемся графиком скорости на рис. 1, согласно которому

$$P = \frac{2}{(t_2 - t_1)} J \varepsilon \int_0^{t_2 - t_1} \frac{\omega_{\max} - \omega_{\text{раб}}}{t_2 - t_1} t dt = \quad (7)$$

$$= J \frac{2}{(17,5 - 15) \cdot 10^{-3}} 55,8 \cdot 10^3 \cdot (122 + 17,4) \cdot (17,5 - 15) \cdot 10^{-3} / 2 = 7,78 J \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Полагая далее, например,  $P = (10 - 15) \text{ Вт}$  из (6), находим допустимую величину момента инерции оптосина:

$$J = \frac{P}{7,78 \cdot 10^6} = \frac{10 \div 15}{7,78 \cdot 10^6} = (1,28 \div 1,93) \cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

сравнимую с моментом инерции двухотсчетного оптосина 1-64 [4] у которого  $J = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  при габаритах  $\varnothing = 58 \text{ мм}$  и  $L = 45 \text{ мм}$ .

С позиций допустимой угловой погрешности оптосина как первичного датчика потребуем, чтобы она не превышала половины импульса первого разряда цифрового датчика углового положения на рабочем участке движения сканирующей электроприводе, или с учетом (6)

$$\Delta\varphi \leq 0,5 \frac{360}{16,3 \cdot 10^3} \cdot 60 = 0,622' = 39,7''.$$

Обращаясь далее к рекомендациям работы [4], определим максимальную относительную погрешность  $\delta u_{\max}$  формирования ортогональных гармонических сигналов точного отсчета оптосина 1-64:

$$\delta u_{\max} = k_p \Delta\varphi = 2,91 \cdot 10^{-4} \cdot 64 \cdot 39,7 / 60 = 12,3 \cdot 10^{-3},$$

где  $k=2,91 \cdot 10^4$  1/угл.мин — крутизна единичного гармонического сигнала;  $p=64$  — число периодов гармонических сигналов за один оборот вала.

При известной величине относительной погрешности  $\delta u_{\max}$  первичных сигналов можно определить долю погрешности  $\delta u'_{\max}$ , вносимую ступенчатой формой окон неподвижного лимба [6]:

$$\begin{aligned} \delta u'_{\max} &= \delta u_{\max} - 2,2 \cdot 10^{-3} - 0,064 \cdot \Delta / R_{\text{уст}} = \\ &= 12,3 \cdot 10^{-3} - 2,2 \cdot 10^{-3} - 0,064 \cdot 1 / 15,8 = 6,1 \cdot 10^{-3}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $2,2 \cdot 10^{-3}$  — доля погрешности за счет неравномерности потока излучателя;  $\Delta=1$  мкм — эксцентриситет установки вращающегося лимба;  $R_{\text{уст}}=15,8$  — радиус установки оптопары. Величина  $\delta u'_{\max}$  является исходной для выбора числа ступеней  $Q$  аппроксимации окон неподвижного лимба [5] или с учетом(8):

$$Q \geq \sqrt{N_1^2 \delta_{1\max} \cdot 10^{-3} / \delta u'_{\max}} = \sqrt{15^2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} / 6,1 \cdot 10^{-3}} = 14,9,$$

где  $N_1=15$  — число ступеней так называемого базового лимба;  $\delta_{1\max}$  — погрешность за счет ступенчатой формы окон неподвижного лимба.

Конструктивный расчет окон неподвижного лимба сводится к определению радиусов, ограничивающих высоту каждой из ступеней аппроксимирующей фигуры (рис. 2), и рассмотрен в работе [6].

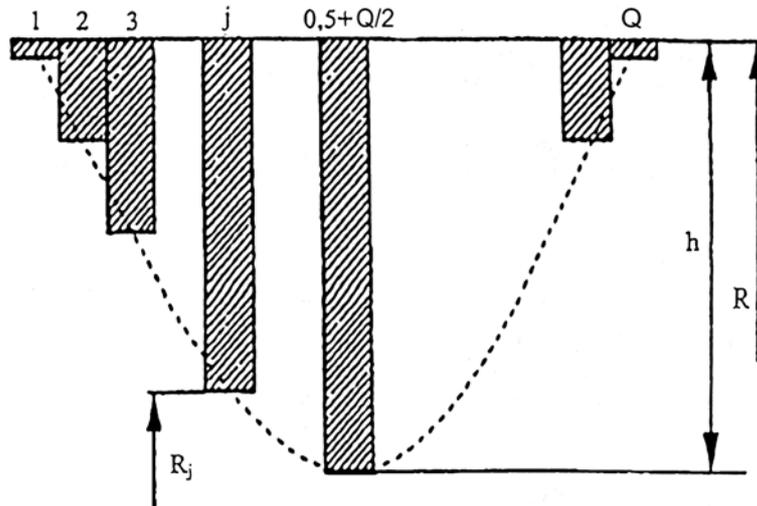


Рис. 2. Профиль окна подвижного лимба

Выбирая нечетное число ступеней аппроксимации окна неподвижного лимба и задаваясь из конструктивных соображений величиной радиуса установки оптранных элементов и максимальной высотой  $h$  ступеней аппроксимирующей фигуры окна, площадь средней ступени  $S_{0,5 \pm Q/2}$  [5] можно вычислить следующим образом:

$$S_{0,5 \pm Q/2} = \frac{\pi R_{\text{уст}}}{2 p Q} \left( 2 \pm \frac{h}{R} \right) h. \quad (9)$$

При этом знак "+" соответствует окну, расположенному выше радиуса установки оптопар, а знак "-" — соответственно ниже.

При известной согласно (9) площади средней ступени можно перейти к определению радиусов  $R_j$ , определяющих высоты остальных ступеней

$$R_j = \sqrt{R^2 \pm R h \left(2 \pm \frac{h}{R}\right) \sin \varphi_{jэл}},$$

где  $\varphi_{jэл}$  — электрический угол, соответствующий середине  $j$ -й ступени.

Формируя таким образом ортогональные гармонические сигналы  $U_m \sin(p\varphi)$  и  $U_m \cos(p\varphi)$ , для получения сигнала о скорости вращения вала достаточно пропустить эти сигналы через фазосдвигающие усилители, а затем перемножить исходные сигналы на сдвинутые по фазе  $\gamma$  выходные сигналы усилителя, после чего произведения вычесть. В результате получим величину  $u$ , зависящую от скорости вращения вала:

$$u = U_m \sin(p\varphi) U_m \cos(p\varphi - \gamma) - U_m \cos(p\varphi) U_m \sin(p\varphi - \gamma) = U_m^2 \sin \gamma.$$

Для обеспечения приемлемой линейности характеристики такого тахометра достаточно ограничить фазовый сдвиг  $\gamma$  на уровне  $30^\circ$  [7].

К вопросу оценки быстродействия или инерционности датчика углового положения и скорости можно подойти с двух позиций.

Согласно одной из них, оценим постоянную времени  $\tau$  фазосдвигающего усилителя при максимальном фазовом сдвиге исходных гармонических сигналов, а именно:

$$\tau = RC \leq \frac{\operatorname{tg}(\gamma/2)}{p\omega} = \frac{\operatorname{tg}(30^\circ/2)}{64 \cdot 122} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ с.} \quad (10)$$

С другой стороны, полагая известной максимальную угловую скорость вращения  $\omega_2 = 122 \text{ с}^{-1}$  электропривода, можно оценить долю постоянной времени фазового сдвига  $\tau$  фазосдвигающего усилителя по отношению к периоду  $T$  гармонических сигналов точного отсчета датчика углового положения и скорости:

$$\tau/T = \frac{3,43 \cdot 10^{-5}}{2\pi/64 \cdot 122} = 0,0426.$$

Таким образом, можно утверждать, что постоянная времени фазосдвигающего усилителя не оказывает существенного влияния на динамические свойства тахометра предлагаемой конструкции и в первом приближении его можно считать безинерционным.

### Заключение

Отметим, что предлагаемый вариант реализации датчика углового положения и скорости сканирующего электропривода тепловизора на основе оптофона 1–64 в полной мере соответствует динамическим параметрам электропривода, а наличие грубого отсчета с одним периодом гармонических сигналов [4] в пределах оборота позволяет реализовать на его основе абсолютный датчик углового положения требуемой точности.

## THE SUBSTANTIATION OF DYNAMIC AND DESIGN PARAMETERS OF THE ANGULAR POSITION AND SPEED SENSOR FOR THE SCANNER INFRARED IMAGER ELECTRIC DRIVE

N.P. BUSEL, A.A. ADDZELNY, A.N. BUSEL

### Abstract

The theoretical estimation of the maximal values of rotation speed and acceleration of the gauge predetermining the choice of its action has been received.

## Литература

1. *Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А.* Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. Казань, 2000.
2. Разработка теоретических основ создания датчика угла и скорости для сканирующего электропривода тепловизионных приборов нового поколения: Отчет о НИР (заключительный). Белорусско-Российский ун-т; Руководитель Н.П. Бусел. ГБ 055ф; № ГР 2005 2656. Могилев, 2006.
3. Преобразователи угловых перемещений. Каталог изделий СКБ ИС. СПб., 2002.
4. *Бусел Н.П.* // Перспективные технологии, материалы и системы: Сб. науч. тр. Могилев, 2005. С. 62–64.
5. *Бусел Н.П.* // Вестн. НТУ "ХПИ", Харьков, 2005. С. 21–23.
6. Разработка эскизно-технического проекта на датчики углового положения "Оптосин 1-64", изготовление макетного и десяти опытных образцов датчиков: Отчет о НИР (заключительный). Белорусско-Российский ун-т; Руководитель Н.П. Бусел. ХД 0249; № ГР 2002 3040. Могилев, 2005.
7. *Бусел Н.П.* // Вестн. Могилевского ГТУ. 2002. № 2. С. 21–25.