ТЕХНОЛОГИИ

УДК 531.76

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСТРОВОГО СОПРЯЖЕНИЯ ДВУХОТСЧЕТНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Н.П. БУСЕЛ[1], А.П. КУЗНЕЦОВ[2], А.Н. БУСЕЛ[1]

[1]*Белорусско-Российский университет*
Пр-т Мира, 43, Могилев, 212005, Беларусь

[2]*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*
П. Бровки,6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 14 января 2009

Обосновывается оптимизация геометрии растрового сопряжения с позиций исключения влияния формы диаграммы излучения светодиода на угловую погрешность точного отсчета, а также второй гармонической составляющей в сигналах грубого отсчета.

Ключевые слова: преобразователь углового положения, двухотсчетный, оптоэлектронный, погрешности, растровое сопряжение, оптимизация.

Введение

Применительно к измерениям углового положения, в настоящее время более востребованными являются оптоэлектронные преобразователи, отличающиеся высокой точностью и технологичностью.

При решении задач, требующих абсолютных измерений, преобразователи выполняются или на основе кодовой шкалы, или двухотсчетными. В известных конструкциях [1] точный отсчет представляет собой синусно-косинусный преобразователь с числом периодов P в пределах оборота, достигающим тысяч единиц, а грубый — кодовую шкалу с 12-ю и более разрядами, например, в преобразователе ЛИР-158ДА.

Наличие высокоразрядной кодовой шкалы усложняет схемотехнику и приближает двухотсчетный преобразователь к более дорогим кодовым. При этом преимущество гармонической формы сигналов и возможность построения на этой основе обоих отсчетов преобразователя, на наш взгляд, недооценивается, так как не принимается во внимание реальная возможность улучшения их формы.

Отдельные аспекты задачи повышения точности формирования гармонических сигналов обоих отсчетов, основанные на кусочно-линейной их аппроксимации, успешно решены в работах [2, 3]. В настоящей же работе основное внимание уделено ослаблению уровня второй гармонической составляющей в сигналах грубого отсчета, а также ослаблению влияния формы диаграммы излучения светодиодов в обоих отсчетах, и, как следствие, достижению высокой точности преобразователя при обеспечении согласованности отсчетов для реализации абсолютных измерений.

Теоретические основы оптимизации растрового сопряжения синусно-косинусных преобразователей углового положения

Гармоническая форма ортогональных гармонических сигналов широко востребована в инкрементных преобразователях с числом периодов P на оборот до 18000 [1]. Главными достоинствами таких конструкций являются невысокие требования к форме гармонических сигналов и доступные средства электронного деления периода.

С другой стороны, большое число периодов сигналов точного отсчета накладывает жесткие требования на угловую погрешность $\Delta\varphi_Г$ грубого отсчета, которая для согласования отсчетов, как показывает практика [1], не должна превышать четверти периода сигналов точного отсчета

$$\Delta\varphi_Г \le 360 \cdot 60 / 4P . \qquad (1)$$

В свою очередь, угловая погрешность грубого отсчета согласно [4] определяется относительной погрешностью $\delta u_Г$ исходных гармонических сигналов:

$$\Delta\varphi_Г = \delta u_Г / 2{,}91 \cdot 10^{-4}, \qquad (2)$$

где $2{,}91 \cdot 10^{-4}$ — максимальная крутизна гармонического сигнала, 1/угл. мин.

Соотношение (1) с учетом (2) следует рассматривать в качестве одного из ограничений при выборе максимального числа периодов сигналов точного отсчета, при котором сохраняется согласованность отсчетов

$$P \le 360 \cdot 60 \cdot 2{,}91 \cdot 10^{-4} / 4\delta u_Г = 1{,}57 / \delta u_Г . \qquad (3)$$

Так как угловая погрешность точного отсчета [4] обратно пропорциональна числу периодов исходных гармонических сигналов, то для достижения высокой точности преобразователя при обеспечении абсолютного отсчета необходимо, в первую очередь, минимизировать относительную погрешность формирования сигналов грубого отсчета.

Известный метод минимизации погрешности грубого отсчета, в котором гармонический сигнал формируется измерительным растром, образованным двумя эксцентричными окружностями [5], не решает эту задачу по двум причинам. С одной стороны, не приняты во внимание погрешности, обусловленные радиальной формой окон индикаторного лимба и куполообразной формой диаграммы излучения светодиода, а с другой — отсутствуют приемлемые способы стабилизации сигналов, необходимых для сохранения точности преобразователя в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды, например, в оборонной технике.

Для исключения упомянутых недостатков известного метода, примем за основу рекомендации работы [2] и выполним измерительный лимб грубого отсчета в виде ступенчатого кольца, представленного на рис. 1.

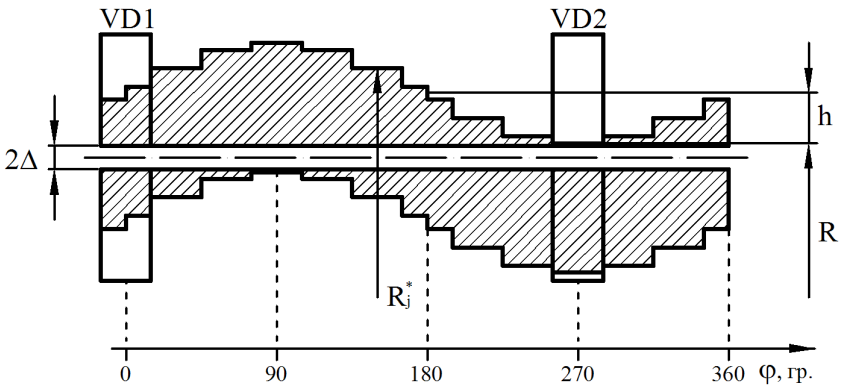

Рис. 1. Расчетная схема грубого отсчета со ступенчатым кольцом измерительного лимба

Погрешность формирования гармонических сигналов в такой конструкции определяется другими, но легко варьируемыми в желаемом направлении факторами. К основному из них

можно отнести число Q ступеней аппроксимации, а ко второму — неравномерность потока светодиодов в пределах окон индикаторного лимба.

Как показано в работе [2], относительная погрешность $\delta' u_Г$ грубого отсчета при равномерном потоке светодиода определяется формулой

$$\delta' u_Г = 6 \cdot 10^{-3} (15/Q)^2 , \qquad (4)$$

где число 15 представляет собой количество ступеней аппроксимации в одном полупериоде, принятое за базовое.

Для исключения составляющей $\delta'' u_Г$ погрешности от неравномерности потока светодиода достаточно определить радиусы R_j ступеней, соответствующие равномерному потоку, как это сделано в работе [6], и скорректировать их так, чтобы среднее значение потока засвеченной части окон индикаторного лимба оказалось постоянным.

В нашем случае

$$R_j = \sqrt{R^2 \pm Rh(2 \pm \frac{h}{R}) \sin \varphi_{jЭЛ}} , \qquad (5)$$

где R — радиус делительной окружности, определяемый конструктивными соображениями; h — максимальная высота ступеней при $\varphi_{jЭЛ} = 90^\circ$; $\varphi_{jЭЛ}$ — электрический угол, соответствующий середине j-й ступени.

Знак "+" в формуле (5) соответствует ступени, расположенной над делительной окружностью.

Если принять во внимание относительно небольшой угловой размер светового потока в пределах фотоприемника, то диаграмму излучения светодиода целесообразно аппроксимировать параболой [7]

$$\lambda\varphi = 1 - kl^2 / L^2 , \qquad (6)$$

где k — коэффициент, учитывающий ослабление яркости светодиода в наиболее удаленных точках окон индикаторного лимба; l — удаленность точек окон индикаторного лимба от оптической оси; L — расстояние от светодиода до фотоприемника.

При этом условии на основании рис. 1 среднюю величину яркости светодиода, например, на границе А измерительного лимба можно определить следующим образом:

$$\lambda_{ACP} = 1 - \frac{k}{L^2} \frac{1}{r} \int_0^r (\Delta_1 + r)^2 dr , \qquad (7)$$

где $\Delta_1 = \Delta + h$; Δ — технологический припуск; h — максимальная высота ступени.

После интегрирования (7) при $r = h \sin \varphi$, получим

$$\lambda_{ACP} = 1 - \frac{k}{L^2} (\Delta_1^{\,2} + \Delta_1 h \sin \varphi + \frac{1}{3} h^2 \sin^2 \varphi) . \qquad (8)$$

Задаваясь далее величиной угла φ_j, соответствующей середине каждой из ступеней аппроксимирующей функции, окончательная величина радиусов R_j^* с учетом (5) и (8) определиться соотношением

$$R_j^* = R_j / \lambda_{ACPj} . \qquad (9)$$

Следует подчеркнуть, что ступенчатая форма кольца измерительного лимба при суммировании сигналов двухплощадочного фотоприемника [8] позволяет получить электрическую константу, необходимую для стабилизации формируемых сигналов.

Скорректированный предлагаемым способом профиль измерительного лимба грубого отсчета исключает составляющую погрешности $\delta'' u_{\Gamma}$, обусловленную неравномерностью потока светодиода, а составляющая $\delta' u_{\Gamma}$ (4) может быть уменьшена до желаемой величины выбором необходимого числа ступеней аппроксимации.

Как показывает практика, при использовании фотоприемников с площадками $a \cdot a$=1,5×1,5 мм, например ФД20-30К, уже при диаметре кольца d=20мм минимальное число ступеней аппроксимации составляет десятки единиц:

$$Q = \pi d / 2a = \pi\ 20/(2 \cdot 1{,}5) = 21,$$

а относительная погрешность сигналов грубого отсчета согласно (4) становится пренебрежимо малой:

$$\delta' u_{\Gamma} = 6 \cdot 10^{-3} (15/Q)^2 = 6 \cdot 10^{-3} (15/21)^2 = 3{,}06 \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

В этом случае максимальное число периодов P_{max} точного отсчета, необходимое для согласования отсчетов, согласно (3) с учетом (10) составит величину

$$P_{\max} \le 1{,}57 / \delta' u_{\Gamma} = 1{,}57 / 3{,}06 \cdot 10^{-3} = 513. \quad (11)$$

В свою очередь, минимальное число периодов P_{min} точного отсчета определяется относительной погрешностью δu_T исходных гармонических сигналов [4]:

$$P_{\min} = 60 \delta u_T / \Delta\varphi_T \cdot 2{,}91 \cdot 10^{-4}, \quad (12)$$

где $\Delta\varphi_T$ — угловая погрешность грубого отсчета в угловых секундах.

Для точного отсчета с шириной окна, равной половине периода формируемых сигналов, относительная погрешность гармонических сигналов определятся тремя основными составляющими [3]:

$$\delta u_T = \delta' u_T + \delta'' u_T + \delta''' u_T. \quad (13)$$

Первой составляющей $\delta' u_T$ по аналогии с грубым отсчетом можно пренебречь, выбирая необходимое число Q ступеней аппроксимации окон индикаторного лимба (4).

Для исключения составляющей $\delta'' u$, зависящей от неравномерности потока светодиода, в отличие от рекомендаций работы [7], выполним окна индикаторного лимба с угловой шириной, равной четверти периода формируемых гармонических сигналов. Расчетная схема такого точного отсчета представлена на рис. 2.

Далее воспользуемся теоремой косинусов для определения расстояния l от оптической оси до точки А на границе окна измерительного лимба, а также квадратичной аппроксимацией (6) диаграммы излучения светодиода и запишем соотношение для величины λ_A освещенности на границе окна измерительного лимба:

$$\lambda_A = 1 - \frac{K}{L^2} (R_{УСТ}^2 + (R_1 + r)^2 - 2R_{УСТ}(R_1 + r)\cos(2\varphi_{ОК} - \varphi)), \quad (14)$$

где $R_{УСТ}$ — радиус установки фотодиода точного отсчета; R_1 — радиус делительной окружности.

Если слагаемое $2R_{УСТ}(R_1 + r)\cos(2\varphi_{ОК} - \varphi)$ представить двумя членами степенного ряда, то соотношение (14) для величины освещенности в точке A на границе окна измерительного лимба существенно упрощается, а среднее значение освещенности на границе окна при $r = h \sin p\varphi$ может быть представлено по аналогии с (7) следующей формулой:

$$\lambda_{ACP} = 1 - \frac{k}{L^2}\frac{1}{r}\int_0^r \lambda_A dr = 1 - \frac{k}{L^2}((\Delta_2^2 + \Delta_2 h \sin p\varphi + \frac{1}{3}h^2 \sin^2 p\varphi + R_{УСТ}^2(2\varphi_{ОК} - \varphi)^2), \qquad (15)$$

где $\Delta_2 = R_1 - R_{УСТ}$.

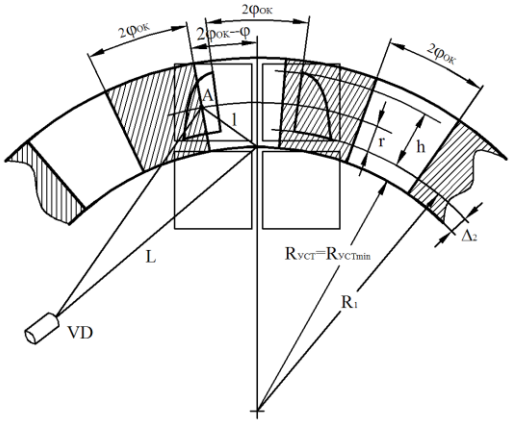

Рис. 2. Расчетная схема точного отсчета с оптимальным растровым сопряжением

Подчеркнем, что соотношение (15) позволяет оптимизировать растровое сопряжение точного отсчета так, чтобы исключить составляющую $\delta'' u_T$ погрешности формирования гармонических сигналов. Для этого необходимо приравнять средние величины освещенности на границах окон индикаторного лимба при $\varphi = 0$ и $\varphi = \varphi_{ОК}$, после чего разрешить полученное равенство относительно величины радиуса установки фотоприемника

$$R_{УСТ} = \sqrt{(3\Delta_2 h + h^2)/9\varphi_{ОК}^2}\ . \qquad (16)$$

Отсюда следует, что задаваясь величинами Δ_2, h и $\varphi_{ОК}$, основываясь на размерах площадок фотоприемника при требуемом радиусе установки, составляющей $\delta'' u_T$ можно пренебречь. В итоге относительная погрешность δu_T сигналов точного отсчета будет определяться только величиной эксцентриситета Δ_m монтажа измерительного лимба (13), [3]:

$$\delta u_T = \delta''' u_T = P\frac{\Delta_m}{R_{УСТ}} \cdot 10^{-3}. \qquad (17)$$

В итоге с учетом (17) на основании (12) находим

$$P_{\min} \geq \frac{60\delta u_T}{\Delta\varphi_T \cdot 2{,}91 \cdot 10^{-4}} = P_{\min} \cdot 10^{-3}\frac{\Delta_m}{R_{УСТ}}\frac{60}{\Delta\varphi_T \cdot 2{,}91 \cdot 10^{-4}}.$$

Полученное соотношение позволяет утверждать, что угловая погрешность точного отсчета не зависит от числа периодов, а минимальный радиус $R_{УСТ\,\min}$ установки фотоприемника определяется эксцентриситетом монтажа измерительного лимба и угловой погрешностью

$$R_{УСТ\,\min} \geq \frac{60\Delta_m}{0{,}291\Delta\varphi_T}. \qquad (18)$$

Например, для преобразователя с погрешностью 15" на основании (18)

$$R_{УСТ\,\min} \geq \frac{60 \cdot 1}{0{,}291 \cdot 15} = 13{,}7 \text{ мм}.$$

Если величина $R_{УСТmin}$ окажется больше требуемой, то необходимо компенсировать погрешность δu_T установкой дополнительной оптронной пары. Однако подчеркнем, что при радиусе установки 13,7 мм и эксцентриситете 1 мкм угловая погрешность предлагаемого преобразователя, равная 15", существенно меньше погрешности лучших мировых образцов [1], а с учетом более простой схемотехники обеспечит, на наш взгляд, его конкурентоспособность на рынке наукоемких технологий.

Заключение

На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) ступенчатая форма кольца измерительного лимба грубого отсчета позволяет обеспечить согласование отсчетов при числе периодов сигналов точного отсчета в пределах сотен единиц;

2) ступенчатая форма окон точного отсчета индикаторного лимба позволяет уменьшить относительную погрешность формирования гармонических сигналов до величины составляющей, обусловленной эксцентриситетом монтажа измерительного лимба;

3) двухотсчетный оптимизированный преобразователь предлагаемой конструкции по точности превосходит лучшие образцы абсолютных кодовых преобразователей сопоставимых габаритов при существенном упрощении схемотехники и уменьшении стоимости.

OPTIMIZATION OF RASTER MATING OF TWO-SPEED OPTOELECTRONIC ANGLE CONVERTER

N.P. BUSEL, A.P. KUZNETSOV, A.N. BUSEL

Abstract

The optimization of raster mating geometry excluding the influence of a diagram shape of the light guide radiation on the angular error of the accurate reading, as well as a second harmonic component in signals of rough reading is substantiated.

Литература

1. Абсолютные датчики углового положения. Каталог изделий Специального конструкторского бюро измерительных систем. СПб., 2007.

2. *Бусел Н.П.* Оптимизация растрового сопряжения оптоэлектронного датчика для коммутации бесколлекторного двигателя // Новые технологии в машиностроении. Ч. 2 // Труды X научн.-техн. конф. проф.-препод. состава, аспирантов и студ. Под общ. ред. М.В. Голуба. Брест: БНП, 1998. С.285-289.

3. *Бусел Н.П., Кузнецов А.П., Бусел А.Н.* // Доклады БГУИР. 2007. № 3. С. 94–101.

4. *Ахмеджанов А.А.* Высокоточные системы передачи угла автоматических устройств. М., 1975.

5. *Пилипович В.А., Есман А.К., Поседько В.С.* Многоэлементные фотоприемники в преобразователях перемещений Минск, 1991.

6. *Бусел Н.П.* Основы теории оптоэлектронных синусно-косинусных преобразователей угловых перемещений // Вестник МГТУ. 2004. № 2. С. 30–32.

7. *Бусел Н.П., Сасин А.В.* // Вест. Нац. техн. ун-та "ХПИ". 2004. С. 17–21.

8. Пат. 6979 Республики Беларусь. МКИ H02P7/68 Способ формирования сигналов управления в следящих и регулируемых электроприводах и устройство для его реализации / Бусел Н.П. Заявл. 23.05.2001; Опубл. 30.06.2005.