

УДК 531.76

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИНУСНО-КОСИНУСНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ**Н.П. БУСЕЛ¹, А.П.КУЗНЕЦОВ², А.Н. БУСЕЛ¹¹Белорусско-Российский университет
просп. Мира, 43, Могилев, 212005, Беларусь²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*Поступила в редакцию 13 февраля 2007*

В статье обоснован метод профилирования окон модулирующих лимбов, проведен расчет основных погрешностей преобразователей и оценены перспективы их применения в системах управления и контроля.

Ключевые слова: преобразователь углового перемещения, оптоэлектронный, погрешности.

Введение

Основываясь на широком круге задач современной техники управления и контроля, которые базируются на гармонической форме информационных сигналов первичных датчиков, подчеркнем значимость теоретических исследований, ориентированных на повышение точности таких датчиков и расширение их функционального применения при обеспечении высокой технологичности конструкции и приемлемой стоимости.

В такой постановке вопроса следует выделить две основополагающие концепции, одна из которых реализована в многочисленных конструкциях электромашинных синусно-косинусных преобразователей углового перемещения. При этом лучшие образцы двухотсчетных редуктосинов отечественного и зарубежного производства [1, 2] имеют угловую погрешность от десятков до единиц угловых секунд, однако их стоимость составляет сотни и тысячи долларов США, что предполагает значительную долю расходов при реализации проектов прецизионных систем управления, в том числе в оборонной технике.

Вторая концепция ориентирована на более прогрессивные технологии, в которых используются преимущества оптоэлектронных средств формирования гармонических сигналов и интегральной электроники при их обработке.

В свою очередь, вторую концепцию можно также разделить на два различных по методологическим подходам направления. В одном из них в основу построения преобразователей закладывается простота конструкции и сравнительно невысокая точность. В этом случае преобразователь выполняется на базе растрового сопряжения из эксцентричного кольца и двух установленных с геометрическим сдвигом 90° двухплощадочных фотоприемников [3], что обеспечивает получение синусного и косинусного сигналов с одним периодом в пределах оборота вала. Теоретические оценки достижимых в такой конструкции погрешностей в известных работах [3, 4] получены в предположении постоянства потока излучателя, не учитывают куполообразную форму его диаграммы и, что важно, существенный дрейф параметров свето- и фотодио-

дов при изменении температуры окружающей среды. В итоге рекомендации исследователей упомянутой конструкции сводятся к применению ее в преобразователях грубого отсчета с погрешностью не менее десятков угловых минут.

Другое направление строится на формировании в пределах оборота большого числа периодов ортогональных, близких к гармоническим сигналов со сравнительно невысокими требованиями к их форме, что используется в широко востребованных инкрементных цифровых преобразователях углового перемещения [5]. Такая конструкция преобразователей позволяет уменьшить погрешности от угловых минут до угловых секунд, высокотехнологична, но в ряде систем неприемлема из-за относительного принципа формирования эквивалента угла, а не абсолютного.

На наш взгляд, потенциальные возможности оптоэлектронных средств формирования прецизионных гармонических сигналов использованы недостаточно по причине отсутствия до недавних пор теоретических работ по конструированию растровых сопряжений точного отсчета с числом периодов на оборот вала, сопоставимым с числом периодов двухотчетных редутокосинов.

Основы теории оптоэлектронных синусно-косинусных преобразователей углового перемещения

Повышение конкурентоспособности оптоэлектронных синусно-косинусных преобразователей углового перемещения по аналогии с двухотчетными редутокосинами возможно за счет использования функциональных растровых сопряжений. Однако это предполагает изыскание новых методов конструирования и технологии изготовления таких сопряжений, а также технических решений, обеспечивающих дифференциальный способ построения электронного тракта, и, что важно, стабильную форму выходных гармонических сигналов.

Если ввести в рассмотрение функцию $\Pi(\varphi)$ пропускания модулятора, угловую ширину окна $\varphi_{ок}$ подвижного лимба и поставить задачу обеспечения гармонического закона измерения светового потока Φ на входе фотоприемника (рис. 1), то в общем случае можно записать следующее соотношение:

$$\Phi = \Phi_m \int_{p(\varphi - \varphi_{ок}/2)}^{p(\varphi + \varphi_{ок}/2)} \Pi(\varphi) d\varphi = k\Phi_m \sin(p\varphi), \quad (1)$$

где Φ_m — максимальное значение потока на выходе модулятора; p — число периодов формируемого гармонического сигнала в пределах полного оборота модулятора; k — конструктивная постоянная.

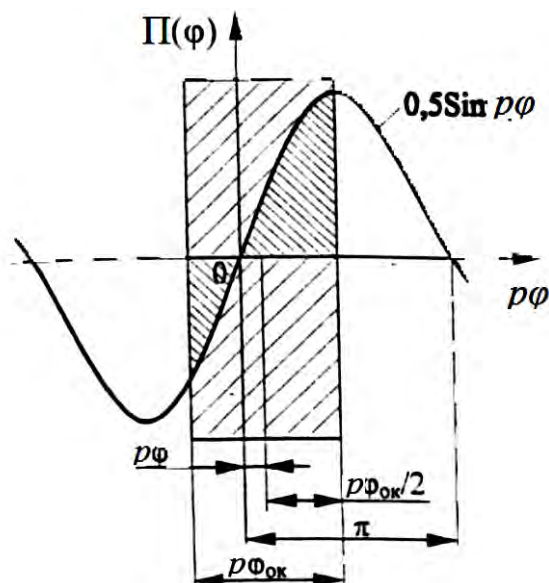


Рис. 1. Функция пропускания модулятора

Предположим далее, что функция $\Pi(\varphi)$ изменяется по гармоническому закону с пространственным периодом p и произвольной фазой:

$$\Pi(\varphi) = A \sin(p\varphi) + B \cos(p\varphi), \quad (2)$$

тогда из (1) с учетом (2) окажется, что функция пропускания модулятора должна изменяться по тому же закону, что и поток на выходе модулятора:

$$\Pi(\varphi) = 0,5 \sin(p\varphi), \quad (3)$$

а величина конструктивной постоянной k в формуле (1) определяется угловой шириной окна модулятора:

$$k = \sin \frac{p\varphi_{ок}}{2}. \quad (4)$$

Из (1) с учетом (4) следует, что при проектировании растрового сопряжения точного отсчета угловую ширину окон вращающегося и неподвижного лимбов следует выбирать одинаковой. Этим самым обеспечивается наибольшее амплитудное значение модулированного потока.

Решение такой задачи впервые предложено одним из авторов на основе раstra, в котором окна неподвижного лимба аппроксимированы ступенчатой фигурой, позволяющей не только получить гармонические сигналы с заданной точностью, но и заставить стабилизировать весь оптоэлектронный тракт (рис. 2).

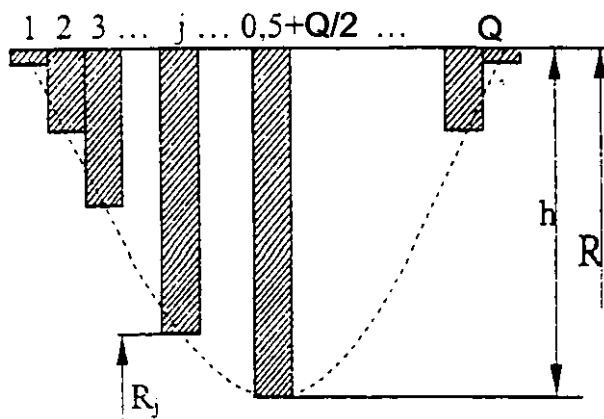


Рис. 2. Форма окон неподвижного лимба

Способ формирования [6] гармонических сигналов со стабильной амплитудой и формой представлен на рис. 3, а соответствующие диаграммы на рис. 4. Главное отличие и достоинство способа основано на кусочно-линейной аппроксимации гармонических сигналов преобразователя и дифференциальной схеме его построения, что позволило синусный и косинусный сигналы точного отсчета преобразователя сформировать на одном четырехплощадочном фотоприемнике и этим самым существенно упростить операции отладки электронного тракта и уменьшить число регулировочных элементов и процедур, задействованных при аттестации готовых изделий.

Действительно, при формировании достаточно близкой к гармонической форме переменных составляющих потоков $\varphi_{11}-\varphi_{22}$ (рис. 2) суммарный поток двух окон модулятора оказывается постоянным по величине, что позволяет ввести отрицательную обратную связь по выходным сигналам преобразователя и тем самым обеспечить стабилизацию всего электронного тракта.

Предложенная и запатентованная конструкция и схемотехника двухотсчетного оптоэлектронного синусно-косинусного преобразователя углового перемещения и способ формирования на его основе сигналов углового положения, рассогласования и скорости положены в основу теоретических оценок предельных погрешностей точного отсчета, обусловленных тремя основными факторами, а именно: числом N ступеней аппроксимации окон неподвижного лимба

(рис. 4), куполообразной формой диаграммы излучателя и эксцентриситетом Δ установки подвижного лимба. Полученные результаты исследований [7, 8] оригинальны и открывают перспективу конкурентоспособности таких преобразователей на рынке наукоемких технологий.

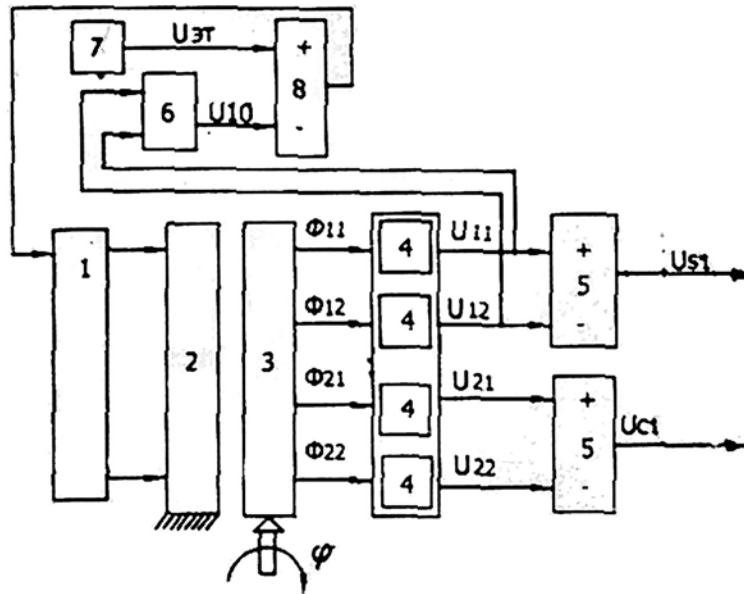


Рис. 3. Способ формирования гармонических сигналов: 1 — светодиод; 2 — неподвижный и 3 — вращающийся лимбы модулятора; 4 — четырехплощадочный фотоприемник; 5, 8 — дифференциальные усилители; 6 — сумматор; 7 — источник эталонного напряжения

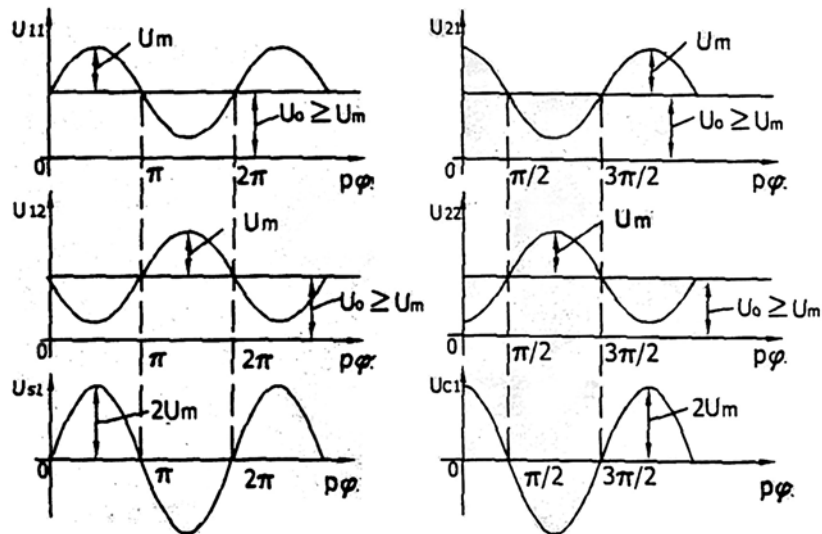


Рис. 4. Диаграммы, поясняющие способ формирования гармонических сигналов

Для оценки погрешности формирования гармонических сигналов из-за неравномерности светового потока впервые предложено ввести в рассмотрение среднее значение $\lambda_{\text{АСР}}$ яркости излучателя на границах А окон подвижного лимба (рис. 5), позволяющее корректировать их форму с учетом реальной диаграммы излучателя.

В нашем случае диаграмма излучателя относительно оптической оси аппроксимирована параболой

$$\lambda = 1 - k(1/L)^2,$$

а среднее значение интенсивности излучения, например, на границе А (рис. 5) одного из окон с учетом теоремы косинусов получено в виде приемлемого для практического использования соотношения

$$\lambda_{ACP} = \frac{1}{h \sin(p\varphi)} \int_0^{h \sin(p\varphi)} \lambda d\varphi = 1 - C - D \sin(p\varphi) - E \sin^2(p\varphi) + F \cos(2\varphi_{ок} - \varphi) + G \sin(p\varphi) \cos(2\varphi_{ок} - \varphi),$$

где константы C , D , E , F и G зависят только от конструктивных параметров оптического сопряжения L , $R_{уст}$, R_0 и h , представленных на рис. 5, и коэффициента k , учитывающего ослабление яркости излучателя на границах окон.

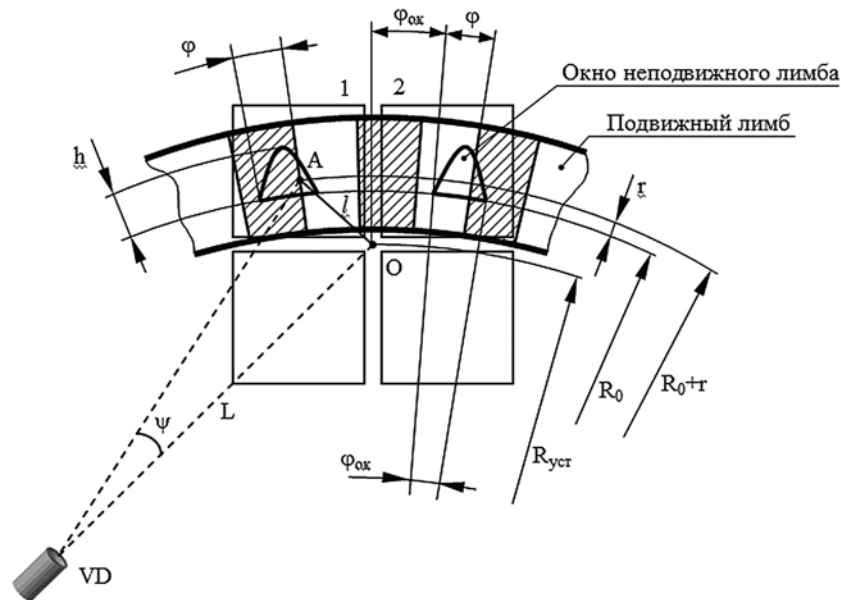


Рис. 5. Расчетная схема для оценки средней яркости

В частности, авторами предложена удобная расчетная формула относительной погрешности гармонических сигналов точного отсчета преобразователя с четырехплощадочным фотоприемником с размером площадок 2×2 мм:

$$\delta_{\max} \leq 6 \cdot 10^{-3} (15/N)^2 + 2,2 \cdot 10^{-3} + 0,064\Delta/R_{уст},$$

где первое слагаемое представляет собой долю погрешности от ступенчатой формы окон неподвижного лимба, второе учитывает форму диаграммы излучателя, а третье — эксцентриситет монтажа вращающегося лимба при установке оптронных элементов на радиусе $R_{уст}$.

Практические расчеты показывают, что для преобразователя стандартных средних габаритов с наружным диаметром $\varnothing=58$ мм при числе ступеней в окне $N=25$; $R_{уст}=15,8$ мм и $\Delta=1$ мкм относительная погрешность точного отсчета

$$\delta_{\max} \leq 2,16 \cdot 10^{-3} + 2,2 \cdot 10^{-3} + 4,05 \cdot 10^{-3},$$

что эквивалентно угловой погрешности [1] точного отсчета с числом периодов на оборот $p=64-\Delta\varphi_{\max}=27,1$ угл. с.

Оценивая полученную угловую погрешность, подчеркнем, что она вдвое меньше погрешности лучших зарубежных двухотсчетных редуктосинов и соизмерима с погрешностью лучших цифровых оптоэлектронных датчиков сопоставимых габаритов [5]. Более того, исключая влияние эксцентриситета установки вращающегося лимба за счет дополнительной оптронной пары, как это предлагается в известных конструкциях [3, 5], погрешность точного отсчета преобразователя можно уменьшить вдвое, а именно, до 13 угл. с [8]. В этом случае предлагаемый двухотсчетный синусно-косинусный преобразователь углового перемещения превзойдет по точности даже прецизионный цифровой инкрементный датчик сопоставимых габаритов, у которого погрешность составляет 15 угл. с.

Следует подчеркнуть, что повышение точности двухотсчетных оптоэлектронных преобразователей до уровня лучших мировых образцов оказалось возможным за счет разработки прогрессивной конструкции, всестороннего математического исследования процессов преобра-

зования сигналов и улучшения свойств оптронной пары, включая патентование процесса юстировки светодиодного излучателя и преобразователя в целом.

При использовании далее разработанного способа формирования ортогональных гармонических сигналов со стабильной формой и амплитудой авторами предложена, запатентована и реализована на практике конструкция высокочастотного тахометра с регулируемой крутизной характеристики, что позволяет применять его в широком диапазоне скоростей, включая сверхнизкие. Этому способствует низкий коэффициент пульсации выходного сигнала на малых скоростях, а также практическое отсутствие зоны нечувствительности.

В настоящее время датчик углового положения и скорости с упомянутыми свойствами востребован для электропривода сканера в проекте перспективного малогабаритного тепловизора.

Функциональная схема двухотсчетного синусно-косинусного преобразователя углового перемещения и тахометра на его основе, а также технические характеристики обоих устройств представлены на рис. 6.

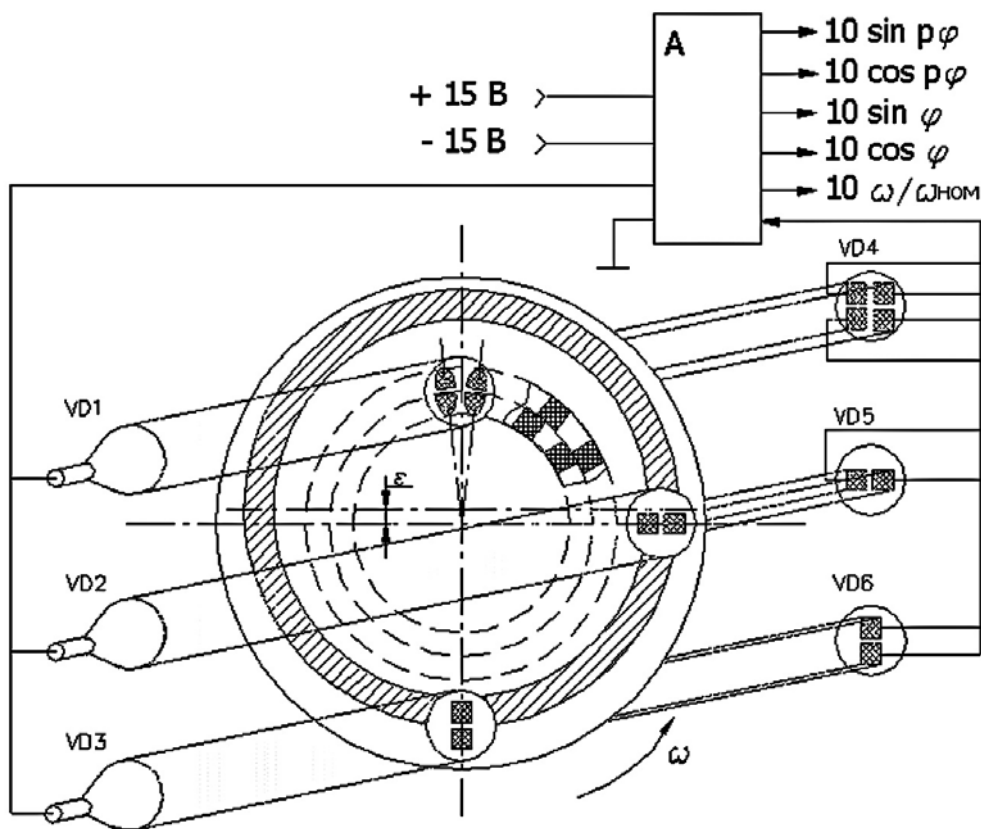


Рис. 6. Функциональная схема преобразователя

Опытная партия преобразователей изготовлена и испытана на соответствие техническим требованиям на предприятии ОАО "Пеленг" (г. Минск) и запланирована к установке в бронетанковые прицелы производства ОАО "Пеленг" и ведущих фирм Российской Федерации.

Результаты экспериментального исследования формы гармонических сигналов реальных преобразователей с отъюстированным излучателем хорошо согласуются с их теоретическими оценками о чем можно судить по рис. 7.

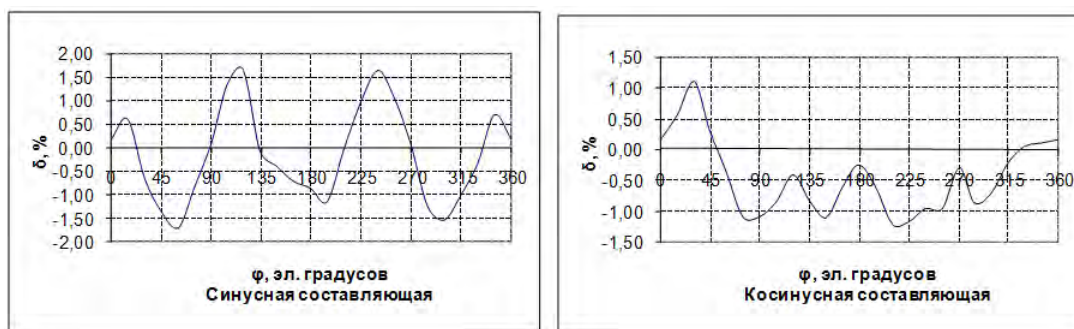


Рис. 7. Относительная погрешность синусного и косинусного сигналов точного отсчета преобразователя

Заключение

Предложенная методика проектирования и оценки погрешностей точного отсчета оптоэлектронных синусно-косинусных преобразователей открывает перспективы их использования при конструировании прецизионных преобразователей углового перемещения, аналогичных двухотсчетным редуктосинам, но на более современной технологической основе и с лучшим соотношением цена/качество.

THEORETICAL FUNDAMENTALS FOR THE CONSTRUCTION OF OPTOELECTRONIC SINE-COSINE ANGLE POSITION AND SPEED CONVERTERS AND THE OUTLOOK FOR THEIR APPLICATION

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

Abstract

In the paper you will find the substantiation of the method for shaping of modulating limbs windows. Also, the estimation of main converter errors is given and the outlook for the converter use in control and testing systems is evaluated.

Литература

1. *Ахмеджанов А.А.* Высокоточные системы передачи угла автоматических устройств: Учеб. пособие для вузов. М., 1975.
2. Бесконтактные вращающиеся трансформаторы типа "редуктосин". Информация ВНИИМЭМ, АОЗТ ПТПФ "ЭЛМА". СПб., 1991.
3. *Пилипович В.А., Есман А.К., Поседько В.С.* Многоэлементные фотоприемники в преобразователях перемещений. Минск, 1991.
4. *Чибухчян А.П.* // Малогабаритный оптический синусно-косинусный преобразователь угла / Фотозэлектрические и волоконно-оптические преобразователи для систем управления и вычислительной техники. Куйбышев, 1986.
5. Преобразователи угловых перемещений. Каталог изделий СКБ ИС. СПб., 2002.
6. 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.
7. *Бусел Н.П., Сасин А.В.* // Вест. Нац. техн. ун-та "ХПИ". 2004. С. 17–21.
8. *Бусел Н.П.* // Вестн. Нац. техн. ун-та "ХПИ". 2005. С. 21–23.