

УДК 681.518.3; 004.3'12

В.А. Пасько, А.А. Сосин, В.П. Лянзбург

Преобразование частоты вращения двигателя-маховика в код

Преобразование частоты вращения двигателя-маховика в код является важной задачей при контроле основных характеристик в системах ориентации и стабилизации космических аппаратов. Существующие методы преобразования не обеспечивают необходимого быстродействия и точности в работе системы. Предлагается решение сложившейся проблемы путем простых тригонометрических преобразований. Рассмотрен принцип построения такой системы, разработаны алгоритм ее работы и средства реализации. Приведены результаты исследования преобразователя для оценки работоспособности и соответствия его необходимым требованиям к данному виду систем.

Ключевые слова: двигатель-маховик, преобразование, частота вращения, код, ПЛИС, кинетический момент, угловая скорость, знак направления вращения.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-121-125

Для контроля кинетического момента и угловой скорости двигателей-маховиков (ДМ) используется частотный сигнал, формируемый датчиком положения ротора. В режиме управления угловая скорость ДМ изменяется в рабочем диапазоне между крайними положительным и отрицательным значениями и может принимать нулевое и близкое к нулю значение. Исходя из этого ставится задача преобразования в код частоты сигнала угловой скорости f_x в широком диапазоне, в том числе в области нуля с формированием знака скорости. Применение известных методов прямого и обратного счета для преобразования частоты в код [1–4] в данном случае практически невозможно из-за неопределенно большого интервала преобразования при близких к нулю значениях частоты, что неприемлемо для управления ДМ. Предлагается решение данной проблемы путем суммирования частоты f_x с некоторой постоянной частотой f_o , в результате чего кодируемый период $T_{ox} = 1/(f_o + f_x)$ имеет конечные значения: максимальное $T_{ox\max} = 1/f_o$ и минимальное $T_{ox\min} = 1/(f_o + f_{x\max})$, где $f_{x\max}$ – максимальное значение частоты.

Функциональная схема и алгоритм работы

На функциональной схеме устройства, работа которого основана на этом принципе (рис. 1), ДПР –

датчик положения ротора; АЦП1, АЦП2 – аналого-цифровые преобразователи; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема, включающая в себя преобразователь частоты (ПЧ), синусно-косинусный генератор опорной частоты (ГОЧ), формирователь кода периода (ФКП); flash-память (flash). $N_{T_{ox}}$ – код периода сигналов $\sin(\omega_x t + \omega_o t)$ и $\cos(\omega_x t + \omega_o t)$, где $\omega_x = 2\pi f_x$, $\omega_o = 2\pi f_o$; N_{ox} – код частоты сигналов ДПР.

Сигналы с выхода ДПР ДМ $\sin(\omega_x t)$, $\cos(\omega_x t)$ поступают на вход микросхем АЦП1, АЦП2, которые оцифровывают эти сигналы и передают на вход ПЛИС для дальнейших преобразований.

Преобразуемая частота вращения увеличивает на фиксированную опорную частоту $f_o = 100$ Гц. Увеличение происходит при помощи тригонометрических преобразований, получивших широкое распространение в цифровой обработке сигналов [5–7]. ГОЧ, реализованный в ПЛИС, формирует сигналы $\sin(\omega_o t)$, $\cos(\omega_o t)$, которые используются для формирования сигналов $\sin(\omega_x t + \omega_o t)$, $\cos(\omega_x t + \omega_o t)$ согласно выражениям

$$\sin(\omega_x t + \omega_o t) = \sin(\omega_x t)\cos(\omega_o t) + \sin(\omega_o t)\cos(\omega_x t);$$

$$\cos(\omega_x t + \omega_o t) = \cos(\omega_x t)\cos(\omega_o t) - \sin(\omega_x t)\sin(\omega_o t).$$

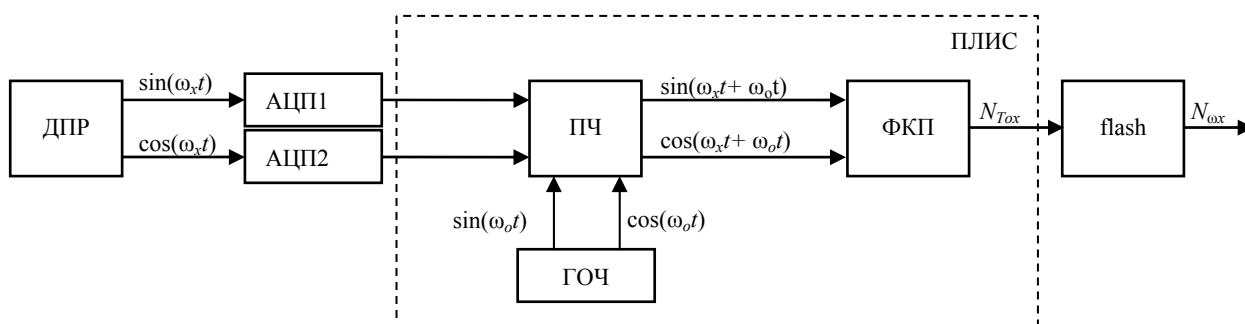


Рис. 1. Функциональная схема преобразователя частота-код

В моменты перехода полученных сигналов через нуль происходит формирование импульсов короткой длительности (ИКД), которые служат разрешающим сигналом для ФКП. За временной проме-

жутком, определяемый моментами перехода через нуль сигналов $\sin(\omega_x t + \omega_o t)$, $\cos(\omega_x t + \omega_o t)$, в ФКП происходит подсчет количества импульсов тактовой частоты. Полученное значение является кодом пе-

риода $N_{T_{ox}}$ указанных сигналов и используется в качестве адреса ячейки flash-памяти. Все возможные значения кодов частоты вращения хранятся в виде таблицы в микросхеме flash-памяти. В конце цикла преобразования в ПЛИС запускается процедура считывания значений кодов частоты N_{ox} из flash-памяти с последующей их выдачей. В результате на выходе преобразователя формируется 16-разрядный двоичный код частоты сигналов ДПР (рис. 2).

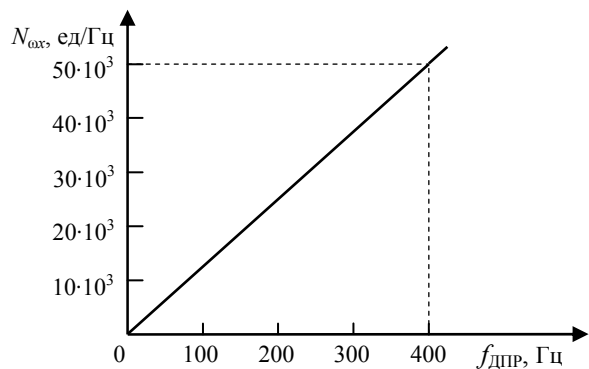


Рис. 2. Зависимость выходного кода от частоты сигналов ДПР

Выбор разрядности выходного кода ограничивается по двум соображениям. При малом количестве разрядов снизится точность преобразования в силу увеличения цены единицы младшего разряда

[8]. При увеличении разрядности возрастают аппаратные затраты на реализацию [9], при том что аппаратные возможности заранее ограничиваются выбранным кристаллом ПЛИС [10]. Исходя из вышесказанного, подобранная разрядность является оптимальной.

Формирование сигнала знака скорости вращения

Согласно алгоритму формирования сигнала знака направления вращения (ЗНВ) при реверсе ДМ (рис. 3) в моменты изменения старших разрядов (с.р.) сигналов $\sin(\omega_x t)$, $\cos(\omega_x t)$ их новые значения сравниваются со значениями с.р. сигналов $\cos(\omega_x t)$ и $\sin(\omega_x t)$ соответственно. При прямом направлении вращения передний фронт с.р. сигнала $\sin(\omega_x t)$ приходится на единицу, а задний – на ноль с.р. сигнала $\cos(\omega_x t)$. Соответственно передний фронт с.р. сигнала $\cos(\omega_x t)$ приходится на ноль, а задний – на единицу с.р. сигнала $\sin(\omega_x t)$. При соблюдении данных условий в моменты изменения сигналов с.р. на линии q_1 формируются сигналы короткой длительности. Если двигатель вращается в обратном направлении, наблюдается противоположная ситуация, а сигналы короткой длительности формируются на линии q_2 . При появлении сигналов на линии q_1 сигналу «ЗНВ» присваивается значение «0», а при появлении на линии q_2 – значение «1».

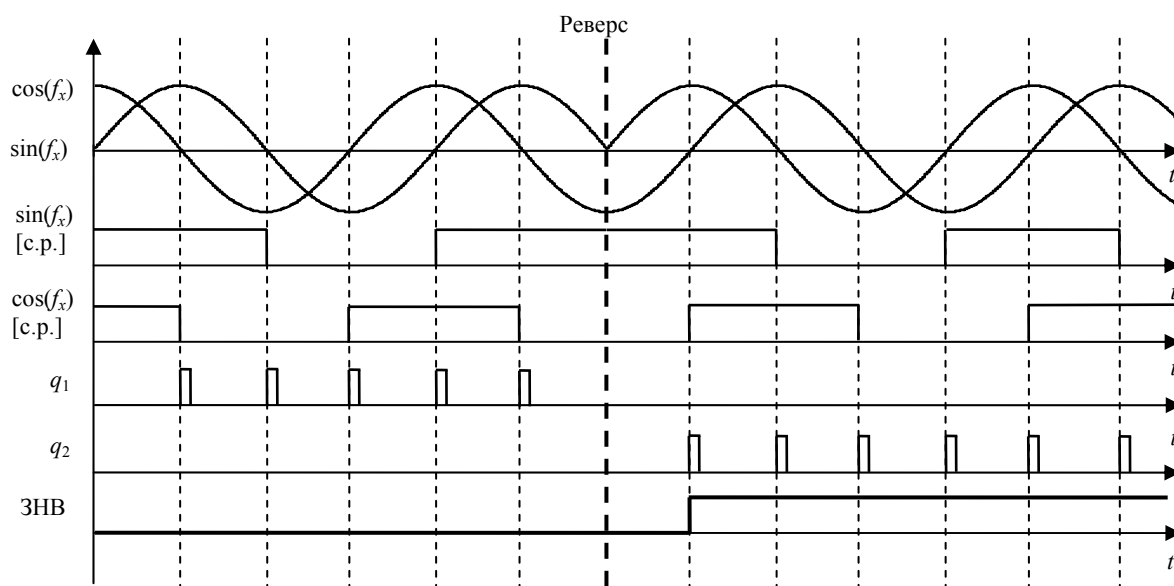


Рис. 3. Алгоритм определения сигнала «ЗНВ»

Экспериментальные исследования

Основой устройства является ПЛИС, что обусловлено ее преимуществами перед микроконтроллерами (МК) [11–13]. В частности, высокие частоты работы, превышающие таковые у МК, обеспечивают высокое быстродействие ПЛИС. Также существенным достоинством является возможность параллельной работы нескольких блоков обработки, тогда как в МК вычисления производятся последовательно, что снижает скорость работы устройства.

Задача, однако, осложняется тем, что стандартные алгоритмы работы с динамически изменяющимися сигналами не дают достаточной точности. Для компенсации этого недостатка необходимо создание более сложных алгоритмов обработки сигналов такого типа [14]. В данном случае разработка алгоритма значительно упрощается тем, что форма сигналов известна заранее, а диапазон изменения частоты вращения ограничен небольшими пределами.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма была составлена модель в системе автоматизированного проектирования ModelSim-Altera 6.4a [15, 16]. При составлении модели была проведена проверка алгоритма тригонометрических преобразований, отработаны участки разгона, торможения двигателя, а также реверса, разгона и торможения в обратную сторону (рис. 4).

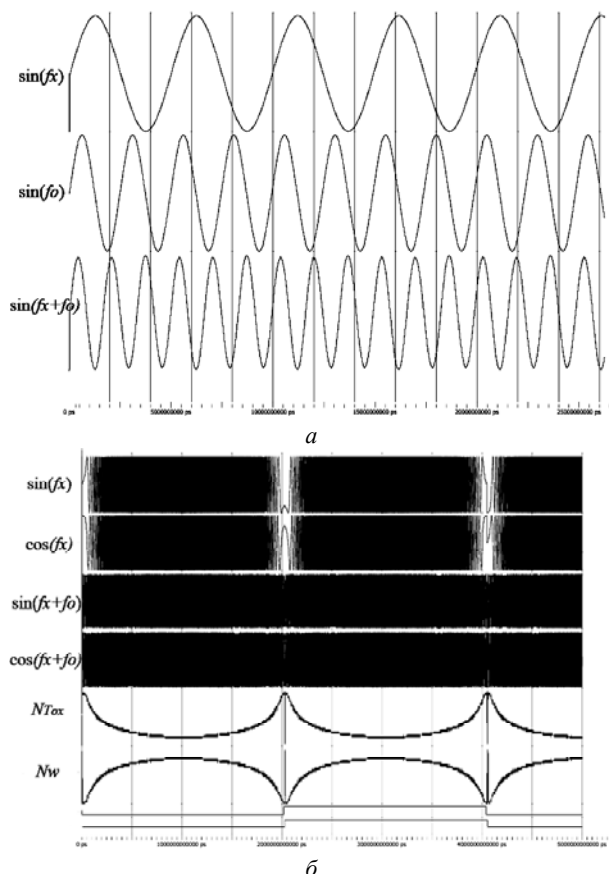


Рис. 4. Результаты моделирования тригонометрических преобразований (а) и цикла разгона-торможения двигателя (б)

Для реализации представленного решения создан макет на основе ПЛИС фирмы Altera EP4C6E22C8. Программа для ПЛИС, описывающая приведенный алгоритм, успешно синтезирована и отлажена на языке Verilog HDL с помощью программного обеспечения от фирмы Altera Quartus II 11.1sp2 Web Edition [17]. Результаты исследования макета представлены в виде осциллограмм работы (рис. 5).

Заключение

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного алгоритма, программы, написанной по нему, и стабильность работы собранного макета. Задержка появления сигналов $\sin(\omega_x t + \omega_o t)$, $\cos(\omega_x t + \omega_o t)$ от появления на входе сигналов ДПР составляет около 10 мкс. Время измерения малых частот вращения в основном определяется значением периода опорной частоты f_o и не превышает 2,5 мс. При максимальной частоте вращения двигателя время измерения составляет примерно 500 мкс.

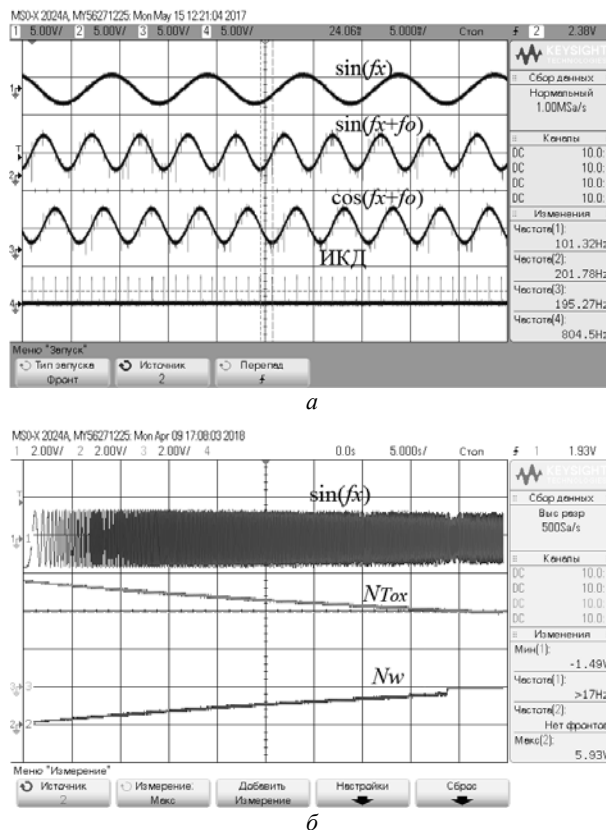


Рис. 5. Осциллограммы работы устройства:

а – тригонометрические преобразования;

б – разгон двигателя

Основным достоинством преобразователя является высокое быстродействие во всем диапазоне частот вращения ДМ, в том числе в области близких к нулю значений.

Литература

1. Микросхемы интегральные 1512ПС11Т : технические условия. АЕЯР.431320.599 ТУ. – Минск: ОАО «Интеграл», 2008. – 82 с.
2. Псурцев В. Частотомер на ПЛИС / В. Псурцев, А. Скворцов // Радио. – 2001. – № 7. – С. 22–25.
3. Ревич Ю.В. Практическое программирование Atmel AVR на языке ассемблера. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 368 с.
4. Михайлов А.В. Проектирование цифровых измерительных устройств: учеб. пособие / А.В. Михайлов, М.Г. Родионов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 184 с.
5. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: Бинном-Пресс, 2006. – 656 с.
6. Шумейко А.А. Применение дискретного тригонометрического преобразования в цифровой обработке сигналов / А.А. Шумейко, В.А. Смородский // Современные информационные и электронные технологии. – 2016. – Т. 1, № 17. – С. 10–11.
7. Stork M. Sine Approximation for Direct Digital Frequency Synthesizers and Function Generators // Proceedings of the 3rd International on Circuits, Systems, Control Signals (CSCS'12). – Barcelona, Spain, 2012. – P. 127–132.
8. Смирнов Ю.М. Проектирование специализированных электронно-вычислительных систем: учеб. пособие / Ю.М. Смирнов, Г.Н. Воробьев, Е.С. Потапов, В.В. Сюезев. – М.: Высшая школа, 1984. – 359 с.

9. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 816 с.

10. Головкин А.А. Компьютерное моделирование и проектирование радиоэлектронных средств: учеб. для вузов. Стандарт третьего поколения / А.А. Головкин, И.Ю. Пивоваров, И.Р. Кузнецов. – СПб.: Питер, 2015. – 208 с.

11. Макмулов И. Выбор между микропроцессором и FPGA // Электронные компоненты. – 2011. – № 4. – С. 85–87.

12. Cavill P. FPGA or DSP for military applications? Both have their place // DSP-FPGA.com Product Resource Guide. – 2005. – P. 24–25.

13. Башкирова Л.А. Анализ эффективности применения аппаратных устройств с репрограммируемой структурой / Л.А. Башкирова, А.А. Елисеев, О.В. Зыбкина // Молодой ученый. – 2017. – № 14. – С. 44–48.

14. Вычужанин В.В. Реализация цифровой обработки сигналов переменной точности на ПЛИС // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 3. – С. 62–66.

15. Поляков А.К. Языки VHDL и Verilog в проектировании цифровой аппаратуры. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 320 с.

16. Коршенбойм И. Краткий курс HDL. – Ч. 8: Моделирование в ModelSim SE // Компоненты и технологии. – 2008. – № 11. – С. 139–144.

17. Ефремов Н.В. Введение в систему автоматизированного проектирования Quartus II: учеб. пособие. – М.: ГОУ ВПО МГУИ, 2011. – 147 с.

searches are given to assess the operability and compliance with the necessary requirements for this type of system.

Keywords: flywheel, conversion, flywheel's speed, code, FPGA, kinetic moment, direction sign.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-121-125

References

1. *Mikroshemi integral'nie 1512PS11T tekhnicheskie usloviya AEYAR.431320.599 TU* [Integral microcircuits 1512PS11T technical conditions AEYAR.431320.599 TU]. Minsk, JSC «Integral», 2008, 82 p.

2. Psurcev V., Skvorcov A. Frequency counter on the FPGA. *Radio*, 2001, no. 7, pp. 22–25 (In Russ.).

3. Revich U.V. *Prakticheskoe programmirovaniye Atmel AVR na yazike assemblera* [Practical programming of Atmel AVR on assembler]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2014. 368 p.

4. Mikhailov A.V., Rodionov M.G. *Proektirovaniye tsifrovikh izmeritel'nykh ustroystv: uchebnoye posobie* [Design of digital computing devices. Tutorial]. Omsk, OmGTU Publ., 2007. 184 p.

5. Lyons R. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Understanding Digital Signal Processing]. Moscow, Binom-Press, 2006. 656 p.

6. Shumeiko A.A., Smorodskiy V.A. Application of discrete trigonometric transformation in digital signal processing. *Modern information and electronic technologies*, 2016, vol. 1, no. 17, pp. 10, 11 (In Russ.).

7. Stork M. Sine Approximation for Direct Digital Frequency Synthesizers and Function Generators. *Proceedings of the 3rd International on Circuits, Systems, Control Signals (CSCS'12)*. Barcelona, Spain, 2012, pp. 127–132.

8. Smirnov Y.M., Vorob'ev G.N., Potapov E.S., Syzev V.V. *Proektirovaniye specializirovannykh elektronno-vicheslitel'nykh sistem: uchebnoye posobie* [Design of specialized electronic computing systems. Tutorial]. Moscow, High school, 1984, 359 p.

9. Ugrymov E.P. *Tsifrovaya skhemotekhnika: uchebnoye posobie dlya vuzov* [Digital circuitry. Tutorial]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2010, 816 p.

10. Golovkov A.A., Pivovarov I.Y., Kuznetsov I.R. *Komputernoe modelirovaniye i proektirovaniye radioelektronnykh sredstv. Uchebnik dlya vuzov. Standart tret'ego pokoleniya* [Computer modeling and design of electronic means. Tutorial. 3rd generation standard]. St. Petersburg, Piter, 2015, 208 p.

11. Makmuov I. Choice between microprocessor and FPGA. *Electronic components*, 2011, no. 4, pp. 85–87 (In Russ.).

12. Cavill P. FPGA or DSP for military applications? Both have their place. *DSP-FPGA.com Product Resource Guide*, 2005, pp. 24, 25.

13. Bashkirova L.A., Eliseev A.A., Zibkina O.V. Analysis of the effectiveness of the use of hardware devices with a reprogrammable structure. *Young scientist*, 2017, no. 11, pp. 139–144 (In Russ.).

14. Vichuzhanin V.V. Implementation of digital signal processing of variable accuracy on the FPGA. *Digital signal processing*, 2011, no. 3, pp. 62–66 (In Russ.).

15. Polyakov A.K. *Yaziki VHDL i Verilog v proektirovaniy tsifrovoy apparatury* [VHDL and Verilog in design of digital equipment]. Moscow, SOLON-Press, 2003, 320 p.

16. Korshenboym I. Short course of HDL. Part 8. Modeling in ModelSim SE. *Components and technologies*, 2008, no. 11, pp. 139–144 (In Russ.).

17. Efremov N.V. *Vvedeniye v sistemu avtomatizirovannogo proektirovaniya Quartus II: uchebnoye posobie* [Introductory course of Quartus II: a textbook].

Пасько Василий Алексеевич

Инженер-конструктор 3-й категории АО «НПП «Полус»
Кирова пр-т, 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 55-46-94
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Сосин Александр Александрович

Вед. инженер-конструктор АО «НПП «Полус»
Кирова пр-т, 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 55-46-94
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Лянзбург Владимир Петрович

Канд. техн. наук, нач. отд. АО «НПП «Полус»
Кирова пр-т, 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 55-46-94
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Pasko V.A., Sosin A.A., Lyanzburg V.P.

Conversion of the flywheel speed into the code

The conversion of the flywheel speed into a code is an important task for controlling the main characteristics in the system of orientation and stabilization of spacecrafts. Existing methods of conversion do not provide necessary speed and accuracy in the operation of the system. Solution to the problem is proposed by simple trigonometric transformations. The principle of constructing, an algorithm of its operation, means of implementation such system is considered. Results of re-

tion to the CAD system Quartus II. Tutorial]. Moscow, MSUF, 2011, 147 p.

Alexander A. Sosin

Lead Engineer, JSC «SIC «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 55-46-94
Email: info@polus-tomsk.ru

Vasiliy A. Pasko

Engineer, JSC «SIC «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 55-46-94
Email: paskovasilii@mail.ru

Vladimir P. Lyanzburg

Head of Department JSC «SIC «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 55-46-94
Email: info@polus-tomsk.ru