

ОСАДЧУК О. В.

Вінницький національний технічний університет
ORCID ID: 0000-0001-6662-9141
e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

ОСАДЧУК Я. О.

Вінницький національний технічний університет
ORCID ID: 0000-0002-5472-0797
e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

СКОЩУК В. К.

Вінницький національний технічний університет
e-mail: skoschuk999@gmail.com

БАГАТОКАНАЛЬНИЙ ЧАСТОТОМІР НА ПРОГРАМОВАНІЙ ЛОГІЧНІЙ ІНТЕГРАЛЬНІЙ СХЕМІ ДЛЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З ЧАСТОТНИМИ СЕНСОРАМИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

У роботі представлено розробку багатоканальної системи вимірювання частоти на FPGA фірми Altera Cyclone IV, основною задачею якої є вимірювання інформативного параметру сенсорів фізичних величин з частотним виходом. Розроблено багатоканальний універсальний вимірювальний прилад на основі FPGA, який має 12 вимірювальних каналів для сенсорів з частотним виходом і підтримує одночасну роботу 127 цифровими сенсорами через I2C інтерфейс. У якості вихідного інтерфейсу використовується широко розповсюджений цифровий протокол UART, який підтримується великою кількістю конверторів. Тому, теоретично, передачу даних з розробленого пристрою можна здійснювати і безпроводним шляхом. До персонального комп'ютера розроблений прилад можна під'єднати через конвертор UART-USB.

Ключові слова: FPGA, багатоканальний частотомір, сенсор з частотним виходом, радіовимірювальні перетворювачі фізичних величин, частота.

ALEXSANDR OSADCHUK, JAROSLAV OSADCHUK, VALENTIN SKOSCHUK
Vinnytsia National Technical University

MULTICHANNEL FREQUENCY METER ON A PROGRAMMABLE LOGICAL INTEGRATED CIRCUIT FOR A RADIOMEASURING SYSTEM WITH FREQUENCY SENSORS

The paper presents the development of a multi-channel frequency measurement system on FPGA by Altera Cyclone IV, the main task of which is to measure the informative parameter of sensors of physical quantities with frequency output. Based on the analysis of existing multi-channel frequency measurement systems on the FPGA, it is established that it is advisable to use multi-channel frequency meters for simultaneous measurement of several frequencies. Unlike several frequency meters operating simultaneously, multi-channel frequency meters perform measurements in a single time base, which is provided by a common exemplary generator and timer. A multi-channel universal FPGA-based measuring device has been developed, which has 12 measuring channels for frequency output sensors and supports simultaneous operation of 127 digital sensors via I2C interface. Therefore, theoretically, data transmission from the developed device can be carried out wirelessly. The developed device can be connected to a personal computer via a UART-USB converter. As a chip for the implementation of the frequency meter is used FPGA company Altera EP4CE10F17C8 - a chip in the BGA case, which has 179 pins. The parameters, namely the value of the signal propagation delay, determine the maximum measured frequency, in our case about 3 ns (delay of the signal from the input to the internal register), which corresponds theoretically to 333 MHz. Specialized software has been developed to test the efficiency of a multi-channel measuring system for measuring informative parameters obtained from radio measuring transducers, based on the reactive properties of semiconductor structures with negative resistance. For convenience of perception, there is a visualization of the received information from the measuring device.

Keywords: FPGA, multichannel frequency meter, sensor with frequency output, radio measuring transducers of physical quantities, frequency.

Постановка проблеми

В останнє десятиліття найбільш поширеними сенсорами фізичних величин стали сенсори з цифровими перетворювачами, які надають користувачу цифрові інтерфейси для отримання вимірних величин. Але паралельно з ними існують сенсори з радіовимірювальними перетворювачами, на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором, які мають частотні виходи з повним збереженням у вихідному сигналі інформації про кількісне значення вимірюваної величини, через забезпечення функціональної залежності [1–4]. Використання таких приладів виключає з їх конструкцій аналого-цифрові перетворювачі, що дозволяє знизити собівартість систем управління, а також створити «інтелектуальні» вимірювальні перетворювачі в результаті поєднання на одному кристалі схем обробки інформації та первинного перетворювача [5–8].

Аналіз останніх досліджень

На даний час важко знайти широко доступні рішення, які б задовольнили вимоги, щодо одночасного вимірювання значень сенсорів з цифровими і частотними виходами. Тому, існує необхідність розробки теоретичних підходів до створення такого роду систем, а також розробки схеми і конструкції.

На основі проведеного аналізу існуючих багатоканальних систем вимірювання частоти на FPGA встановлено, що для одночасного вимірювання декількох частот доцільно застосовувати багатоканальні частотоміри. На відміну від кількох частотомірів, що працюють одночасно, багатоканальні частотоміри здійснюють вимірювання в єдиній базі часу, що забезпечується загальним зразковим генератором і лічильником часу. Один з найбільш схожих приладів на систему, яка представлена в даній роботі, є пристрій, описаний авторами [9]. Пристрій містить три вимірювальних канали, принцип його дії можна розглянути на прикладі роботи одного каналу. В одному каналі є три лічильника, при цьому один з них є загальним для всіх каналів. Таким чином, в цьому пристрої один лічильник здійснює безперервне вимірювання часу, підраховуючи кількість імпульсів зразкової частоти, інший лічильник підраховує кількість імпульсів вимірюваної частоти, третій лічильник здійснює вимірювання тривалості коректуючих імпульсів, сформованих спеціальною схемою і розтягнутих у часі в 1000 разів з високою точністю. У багатоканальному лічильнику час вимірюється загальним лічильником (рис. 1), лічильники для кожного каналу індивідуальні.

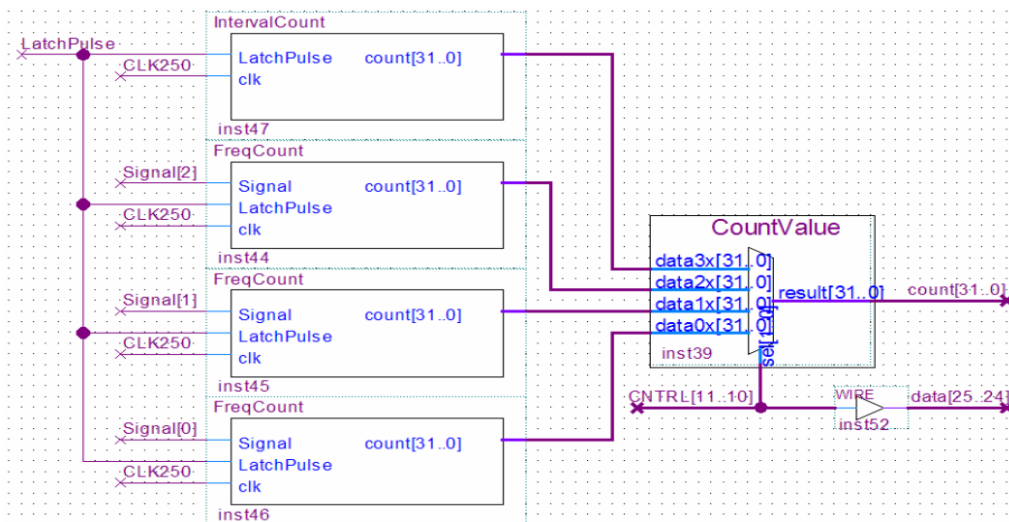


Рис. 1. Структура модуля лічильника [9]

Лічильники часу і лічильники кількості імпульсів працюють без зупинки, читання їх показань здійснюється без зупинки лічби, що забезпечується схемою синхронізації імпульсів, а також відповідним вибором малої розрядності цих лічильників. У використаному технічному рішенні старші розряди лічильника відновлюються програмно. Від кожного імпульсу схема синхронізації формує новий імпульс, затриманий до часу приходу чергового переднього фронту імпульсів зразкової частоти, тому момент зміни коду лічильників завжди збігається з моментом надходження одного з цих фронтів (рис. 2) [9]. Читання кодів лічильників в регістр синхронізовано з задніми фронтами цих же імпульсів.

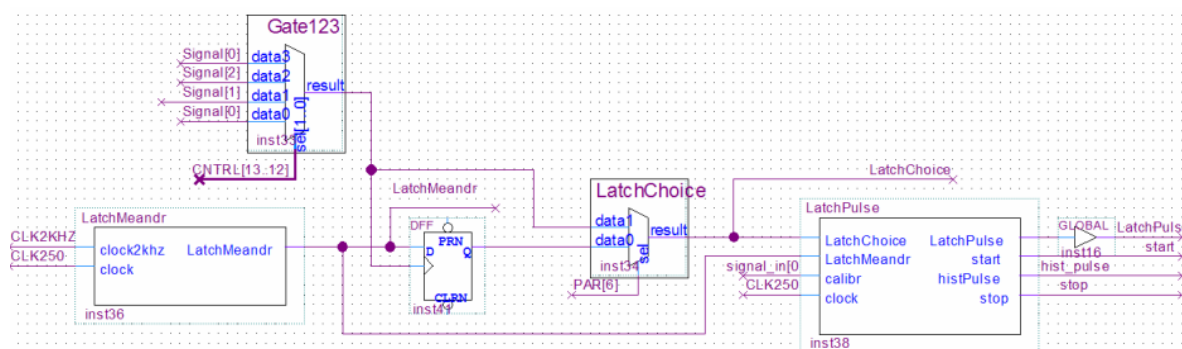


Рис. 2. Структура лічильника часу [9]

Метою роботи є розробка багатоканальної вимірювальної системи, яка одночасно зможе працювати із сенсорами принцип роботи яких базується на використанні функціональної залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором і цифровими сенсорами фізичних величин.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Хоча ціль у розглянутого приладу така ж сама – вимірювання частоти, але шляхи її досягнення різні. Реалізація системи, розробка якої представлена в даній роботі, краще пристосована до внесення змін і розширення функціональної складової, запропонована система є більш універсальною завдяки підтримці сучасних цифрових інтерфейсів.

В якості мікросхеми для реалізації частотоміра використовується FPGA фірми Altera Cyclone IV EP4CE10F17C8 – мікросхема в корпусі BGA, що має 179 виводів, більш детальні характеристики сімейства чіпів Cyclone IVE знаходяться у [10]. Параметрами, а саме значенням затримки поширення сигналу, визначається максимальна вимірювана частота. В даному випадку близько 3 нс (затримка проходження сигналу від входу до внутрішнього регістра) відповідає теоретично 333 МГц [10]. Вибір саме цієї FPGA аж ніяк не є обов'язковим, в даному проєкті можна застосувати будь-яку FPGA в будь-якому корпусі, але з кількістю логічних елементів не менше 4000, відповідно доведеться перекомпілювати проєкт під застосується нової FPGA.

FPGA – це електронний компонент, який використовується для створення цифрових інтегральних схем. На відміну від звичайних цифрових мікросхем, логіка роботи FPGA не визначається при виготовленні, а задається за допомогою програмування (проектуювання). Для цього використовуються спеціальні середовища розробки, що дозволяють задати бажану структуру цифрового пристрою у вигляді принципової електричної схеми або програми на спеціальних мовах опису апаратної структури Verilog, VHDL, AHDL. Це забезпечує бажану гнучкість як при створенні, так і при застосуванні.

Для створення проєктів під FPGA компанії Altera використовується середовище розробки – Quartus. Версій Quartus існує дуже велика кількість, тому потрібно вибрати найбільш стабільну і з підтримкою вибраної мікросхеми. Було вибрано версію Quartus 15.1 [11]. Для роботи з мікросхемою EP4CE10F17C8 потрібен сам Quartus і пакет для підтримки Cyclone IV (cyclone-15.1.0.185.qdz).

Розроблено багатоканальний універсальний вимірювальний прилад на основі FPGA фірми Altera Cyclone IV, який має 12 вимірювальних каналів для сенсорів з частотним виходом і підтримує одночасну роботу 127 цифровими сенсорами через I2C інтерфейс. У якості вихідного інтерфейсу використовується широко розповсюджений цифровий протокол UART, який підтримується великою кількістю конверторів. Тому, теоретично, передачу даних з розробленого пристрою можна здійснювати і безпроводним шляхом. До персонального комп'ютера розроблений прилад можна під'єднати через конвертор UART-USB. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для перевірки працездатності багатоканальної вимірювальної системи. Для зручності сприйняття, відбувається візуалізація отриманої інформації від вимірювального приладу.

Розглянемо синтезований блок керування лічильниками імпульсів. Одним із основних блоків розроблюваного пристрою є формувач сигналів керування, рис. 3. Код для синтезу даного блока написаний на мові опису обладнання – Verilog.

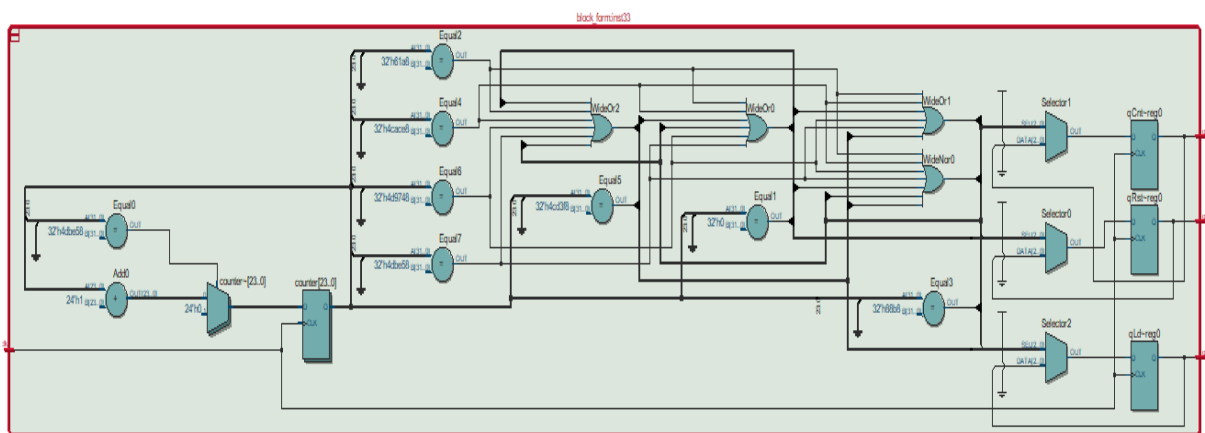


Рис. 3. Схематичне зображення генератора сигналів керування

У якості вхідного параметра він приймає сигнал від основного генератора на 50 МГц. На виході послідовно створюються три сигнали керування: «qRst» скидає значення лічильників, тривалість 0.5 мс (рис. 4); «qCnt» запускає підрахунок імпульсів на вхідних каналах, тривалість 100 мс (рис. 5); «qLd» запускає процес обробки і інтерпретації даних з лічильників, тривалість 1 мс (рис. 6).

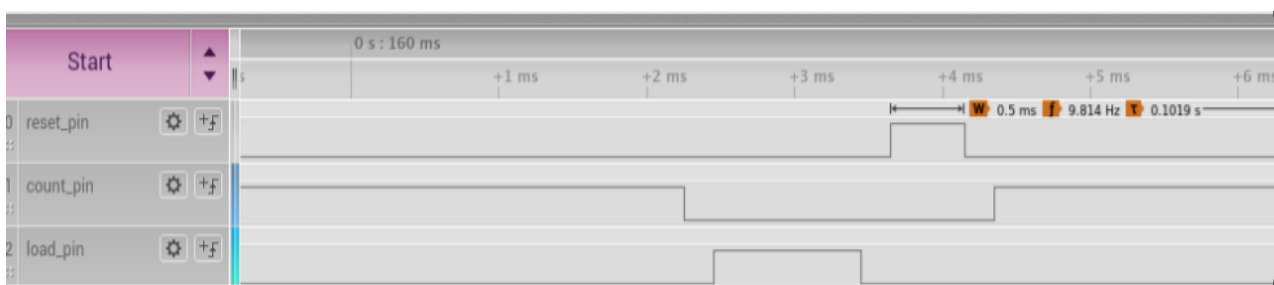


Рис. 4. Сигнал керування «qRst»

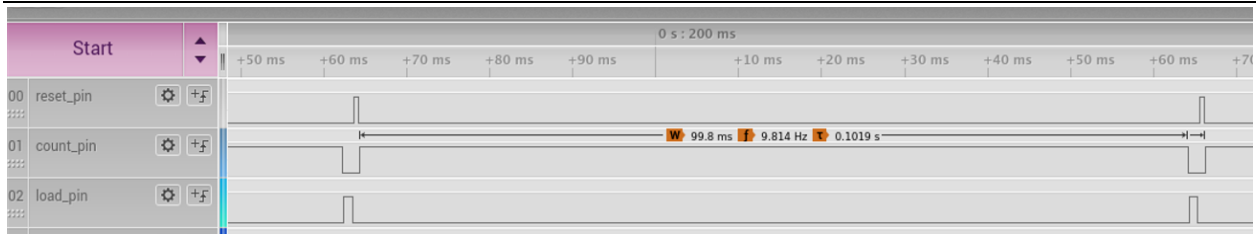


Рис. 5. Сигнал керування «qCnt»

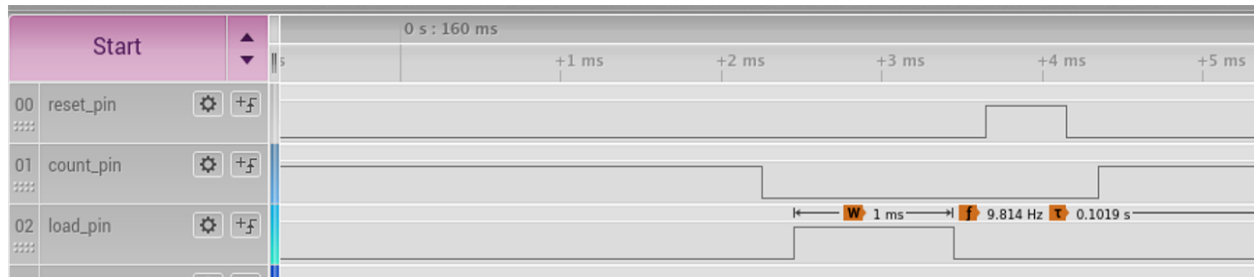


Рис. 6. Сигнал керування «qLd»

Блок лічильника імпульсів. Наступним не менш важливим компонентом є лічильник імпульсів, рис. 7.

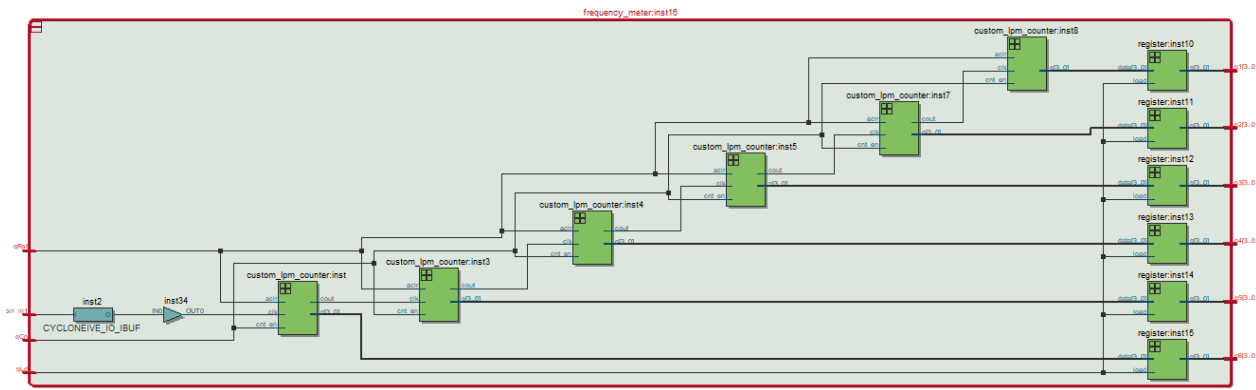


Рис. 7. Схематичне зображення лічильника імпульсів

Лічильник складається з трьох основних компонентів: тригер Шміта, що забезпечує завадостійкість на вході; блоків «custom_lpm_counter», які виступають у якості десяткових лічильників з можливістю перенесення старшого розряду, вони рахують у діапазоні від 0 до 9 (включно), рис. 7, опис блоку також написаний на мові Verilog; чотирьохрозрядних регістрів тимчасового зберігання значень лічильників, рис. 8.

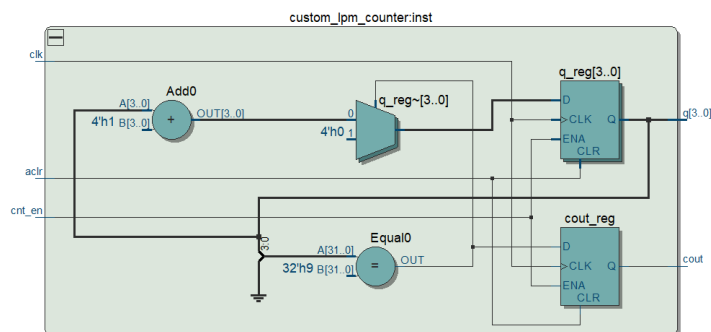


Рис. 8. Схематичне зображення десяткового лічильника

На вхід блоку лічильника подається сигнал від генератора частоту якого необхідно виміряти, після чого сигнал керування «qCnt» приймає високий рівень і компоненти «custom_lpm_counter» починають рахувати, переносючи кожний 10 імпульс на сусідній «custom_lpm_counter», який під'єднаний до виходу «cout», таким чином після завершення роботи кожний з компонентів містить у собі один із розрядів десяткового числа. Після того як «qCnt» приймає низький рівень усі «custom_lpm_counter» одночасно

припиняють підрахунок імпульсів і очікують на наступні команди. Наступним командним сигналом являється «qLd», який змушує компоненти «custom_lpm_counter» вивантажити свої значення у регістри «register», з яких дані будуть зчитані наступним ключовим блоком системи. Останнім з'являється сигнал «qRst» і очищає значення компонентів «custom_lpm_counter». Чотирьох розрядний регістр тимчасового зберігання значень лічильників представлено на рис. 9.

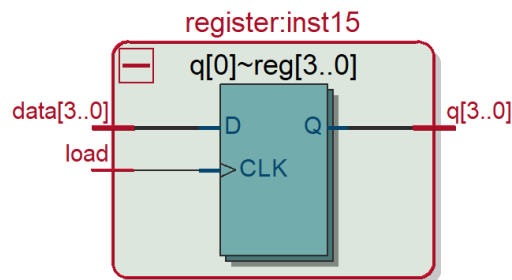


Рис. 9. Схематичне зображення регістра тимчасових значень

Розглянемо блок обробки даних з лічильників. Дані після лічильника розбиті на шість чотирьох розрядних значень, даний формат не являється зручним для швидкого аналізу людиною, тому необхідний блок для конвертування даних від лічильників у числа в десятковій системі і запису їх у вигляді ASCII символів [11]. Таким блоком є блок «txtgen». Код на мові опису обладнання – Verilog. Після підняття командного сигналу «qLd», блок у внутрішній регістр зберігає значення, яке вказує на перший розряд першого лічильника:

```
***
reg [96:0]shift;
...
shift<={shift[96:0],qLd};
***
```

До блоку «txtgen» також під'єднаний особистий генератор з частотою 1 кГц. Кожний імпульс від генератора зміщує вказівник на один розряд, таким чином за шість імпульсів буде оброблено дані від одного лічильника:

```
***
reg [96:0]shift;
always @(posedge led1)
    shift<={shift[96:0],qLd};
assign wr = (shift!=0);
***
```

Коли вказівник оновлено відбувається конвертація чотирьох розрядного двійкового значення у ASCII символ:

```
***
if(val<10) ascii = val+8'h30;
elseascii = val + 8'h41 - 10;
***
```

Після конвертації ASCII символ відправляється у чергу, де очікує на обробку наступним блоком системи:

```
***
assign byte_wr = shift[0] ? ascii( f1[3:0] ) :
...
shift[93] ? ascii( fh6[3:0] ) :
shift[94] ? 8'h30:
[95] ? 8'h0D :
8'h0A;
***
```

Наступний блок, який ми розглянемо – це блок UART передавача. ASCII символи послідовно зчитуються із черги, куди їх було передано з блоку «txtgen», і синхронно передаються по UART протоколу [12], рис. 10. Код даного блоку також написаний на мові опису обладнання – Verilog.

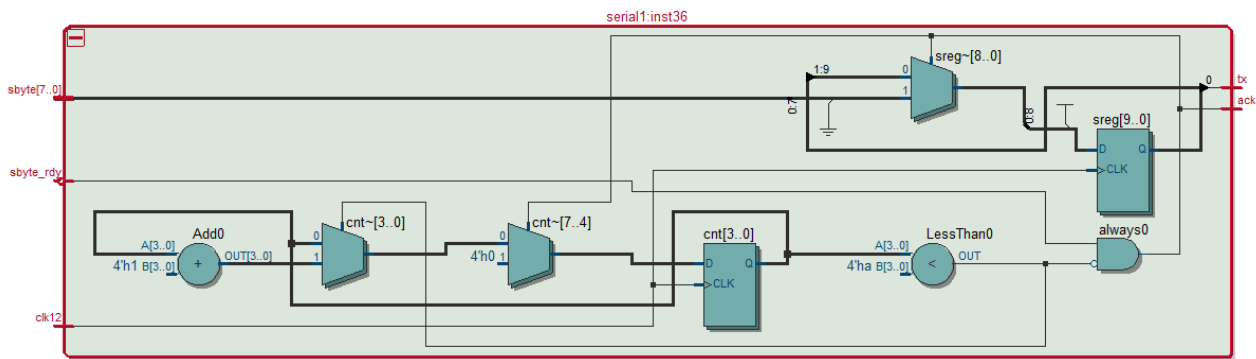


Рис. 10. Схематичне зображення UART передавача

Для реалізації UART передавача було створено окремий генератор, з частотою 115 кГц, який дозволяє передавати дані на швидкості 115200 бод, рис. 11.

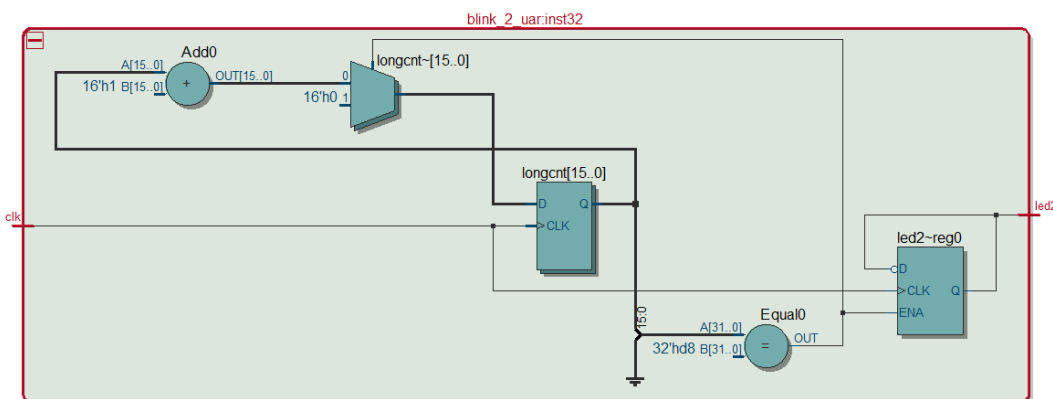


Рис. 11. Схематичне зображення генератора UART передавача

Синтез схеми багатоканального частотоміра. Після реалізації усіх необхідних компонентів, необхідно поєднати їх в одній схемі. На рис. 12 зображене поєднання компонентів, які використовуються для передачі даних:

- 1) «myfifo» – буфер для зберігання оброблених даних з лічильників (256 біт);
- 2) «blink_2» – генератор UART передавача;
- 3) «serial1» – UART передавач на швидкості 115200 бод.

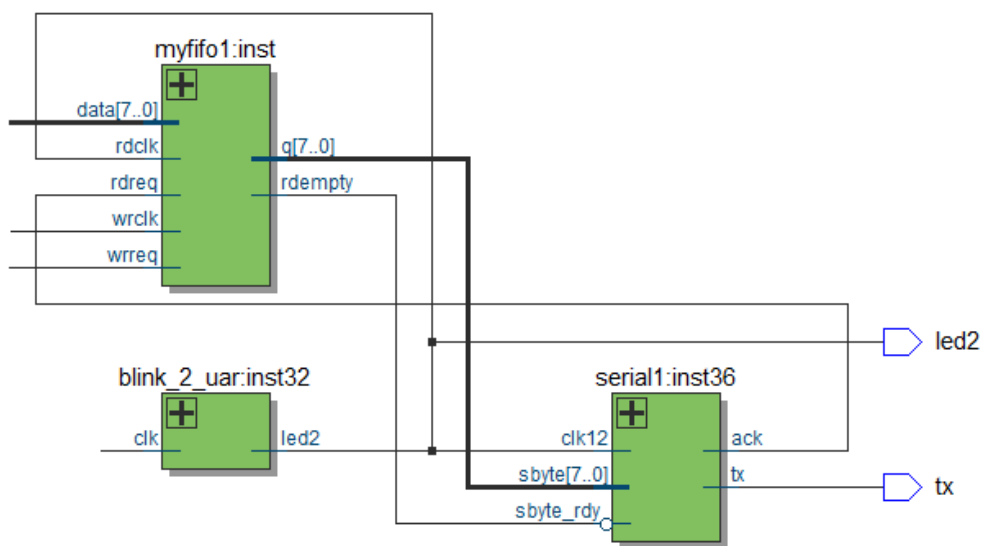


Рис. 12. Схематичне зображення підсистем передачі даних

На рис. 13 зображено поєднання компонентів які використовуються для отримання і обробки даних:

- 1) «frequency_meter» – лічильник імпульсів (у розробленій схемі використовується 12 лічильників, але для відображення було використано лише два);

- 2) «block_form» – блок керування лічильниками і обробкою їх значень;
- 3) «blink_1» – генератор обробки даних;
- 4) «txtgen» – блок обробки даних від лічильників.

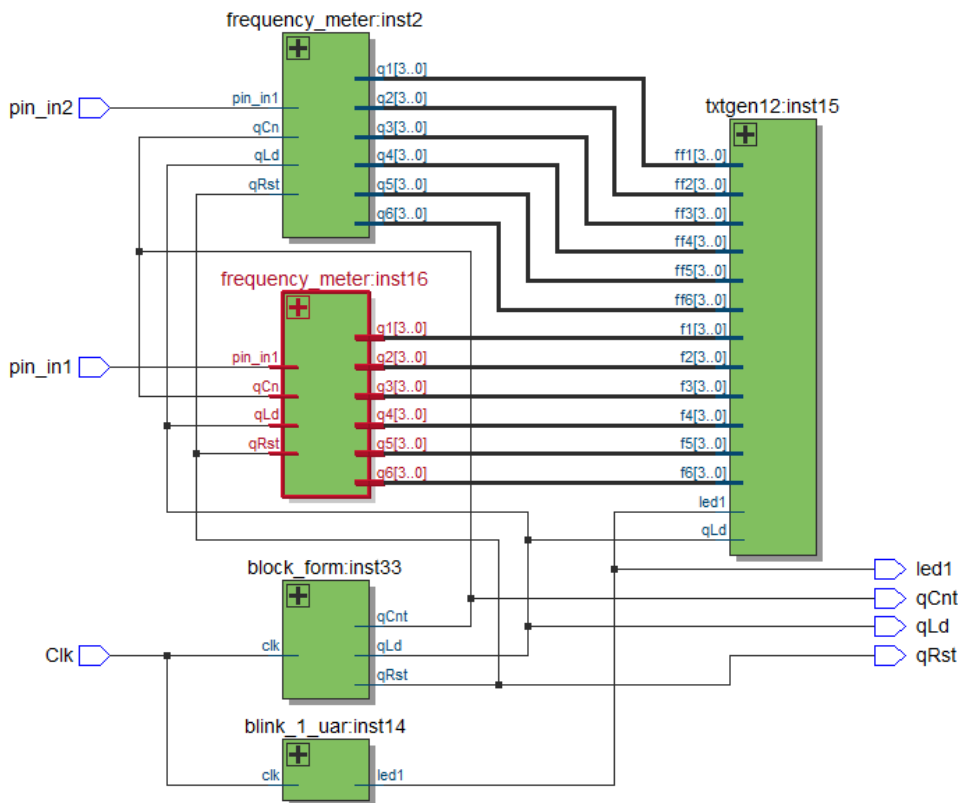


Рис. 13. Схематичне зображення підсистем отримання і обробки даних

На рис. 14 зображено поєднання компонентів які використовуються для отримання і передачі даних багатоканального частотоміра для вимірювання інформативних параметрів отриманих з радіовимірювальних перетворювачів, на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від’ємним опором, які мають частотні виходи з повним збереженням у вихідному сигналі інформації про кількісне значення вимірюваної величини.

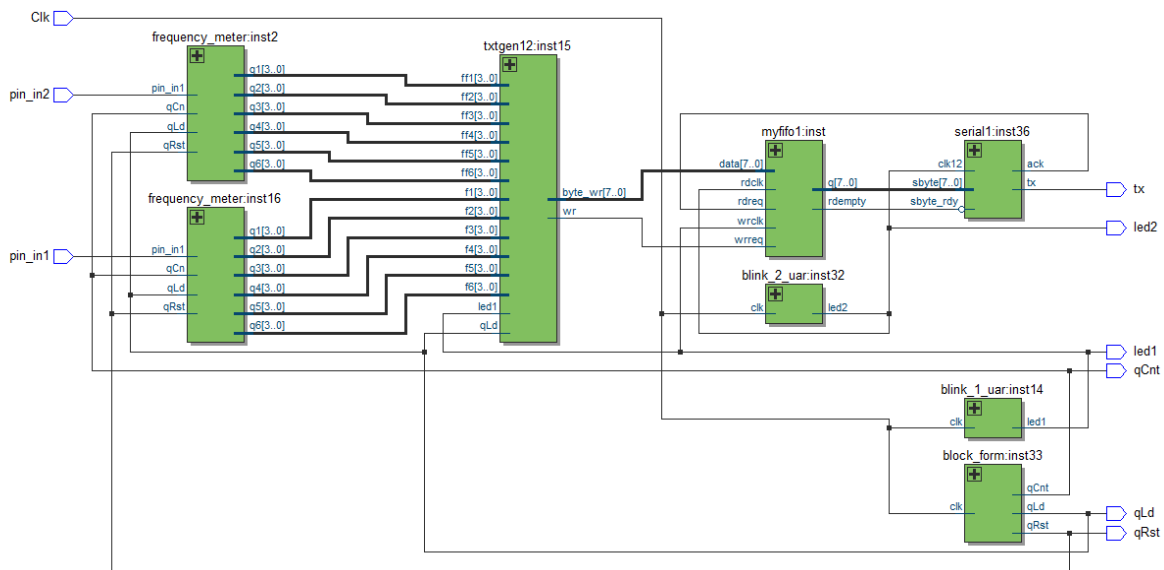


Рис. 14. Схема багатоканального частотоміра

Основним призначенням розробленої системи являється одночасне вимірювання значень у радіовимірювальних сенсорів із частотним виходом. На рис. 15 зображено результат роботи багатоканальної вимірювальної системи на FPGA для радіовимірювальних частотних сенсорів при під’єднанні генератора із частотою 85 кГц, на рис. 16 при роботі із радіовимірювальними сенсорами тиску.



Рис. 15. Вимірювання частоти під'єданого генератора



Рис. 16. Вимірювання значень радіовимірювальних сенсорів тиску з частотним виходом

Висновки

Розроблено багатоканальний універсальний вимірювальний прилад на основі FPGA фірми Altera Cyclone IV, який має 12 вимірювальних каналів для сенсорів з частотним виходом і підтримує одночасну роботу 127 цифровими сенсорами через I2C інтерфейс. У якості вихідного інтерфейсу використовується широко розповсюджений цифровий протокол UART, який підтримується великою кількістю конверторів. Тому, теоретично, передачу даних з розробленого пристрою можна здійснювати і безпроводним шляхом. До персонального комп'ютера розроблений прилад можна під'єднати через конвертор UART-USB. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для перевірки працездатності багатоканальної вимірювальної системи. Для зручності сприйняття, відбувається візуалізація отриманої інформації від вимірювального приладу.

Література

1. Осадчук В. С. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем / Осадчук В. С., Осадчук А. В. – Винница : «Универсум-Винница», 1999. – 275 с.
2. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
3. Джексон Р.Г. Новейшие датчики / Джексон Р.Г. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
4. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – Москва : Техносфера, 2005. – 592 с.
5. Oleksandr V. Osadchuk, Volodymyr S. Osadchuk, Iaroslav O. Osadchuk, Maksat Kolimoldayev, Pawel Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104451X (August 7, 2017).
6. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities. Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 21-23 May 2015. Omsk. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147167
7. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O., Titova N.V., Pinaeva O.Yu., Piotr Kisała, Saule Rakhmetullina, Aliya Kalizhanova, Zhanar Azeshova. Optical-frequency gas flow meter on the basis of transistor structures with negative differential resistance. Proc. SPIE 11456, Optical Fibers and Their Applications 2020, 114560F (12 June 2020). P. 74–81. <https://doi.org/10.1117/12.2569771>

8. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019).
9. Жмудь В.А. Прецизионный частотомер для фундаментальной метрологии / В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 2(8). – С. 73–80.
10. Cyclone IV Device Datasheet. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyiv-53001.pdf>. Excess date: 17.10.2021
11. Quartus Prime Standard Edition. URL: <https://fpgasoftware.intel.com/15.1/?edition=standard&platform=windows>

References

1. Osadchuk V. S. Reaktivnye svoystva tranzistorov i tranzistornyh shem / Osadchuk V. S., Osadchuk A. V. – Vinnica : «Universum-Vinnica», 1999. – 275 s.
2. Datchiki : spravochnoe posobie / pod obsh. red. V.M. Sharapova, E.S. Polishuka. – Moskva : Tehnosfera, 2012. – 624 s.
3. Dzhekson R.G. Novejshie datchiki / Dzhekson R.G. – Moskva : Tehnosfera, 2007. – 384 s.
4. Frajden Dzh. Sovremennye datchiki : spravochnik / Dzh. Frajden. – Moskva : Tehnosfera, 2005. – 592 s.
5. Oleksandr V. Osadchuk, Volodymyr S. Osadchuk, Iaroslav O. Osadchuk, Maksat Kolimoldayev, Pawel Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104451X (August 7, 2017).
6. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities. Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015. Omsk. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147167
7. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O., Titova N.V., Pinaeva O.Yu., Piotr Kisała, Saule Rakhmetullina, Aliya Kalizhanova, Zhanar Azeshova. Optical-frequency gas flow meter on the basis of transistor structures with negative differential resistance. Proc. SPIE 11456, Optical Fibers and Their Applications 2020, 114560F (12 June 2020). P. 74–81. <https://doi.org/10.1117/12.2569771>
8. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019).
9. Zhmud V.A. Precizionnyj chastotomer dlya fundamentalnoj metrologii / V.A. Zhmud, A.M. Goncharenko // Avtomatika i programmaya inzheneriya. – 2014. – № 2(8). – С. 73–80.
10. Cyclone IV Device Datasheet. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyiv-53001.pdf>. Excess date: 17.10.2021
11. Quartus Prime Standard Edition. URL: <https://fpgasoftware.intel.com/15.1/?edition=standard&platform=windows>

Рецензія/Peer review : 05.11.2021

Надрукована/Printed :30.12.2021