

ЦИФРОВИЙ ФАЗОМЕТР НА ПЛІС

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Роботу присвячено дослідженню та розробці цифрового фазометру на програмованій логічній інтегральній схемі. Застосування програмованих логічних інтегральних схем набагато спрощує реалізацію основних вузлів фазометра (таких, як лічильник, вузол порівняння та ін.) та їх взаємодію. Звідси виникають переваги у порівняно малій ціні пристрою. В ході роботи було перевірено можливість роботи по частинах над проектом, про що свідчить реалізація цифрового фазометра одним розробником та каскаду дешифраторів семисегментного коду іншим. Після виконання даної роботи достатньо легко виконати об'єднання цих проектів в одне ціле для створення цифрової частини фазометра на програмованій логічній інтегральній схемі.

Ключові слова: фазометр, Quartus, Intel, FPGA.

Abstract

The paper is devoted to the research and development of a digital phase meter on a programmable logic integrated circuit. The application of programmable logic integrated circuits greatly simplifies the implementation and interaction of the main units of the phase meter (such as counter, comparison node, etc.). This is why the device has a relatively low price. During the work the possibility of work on parts on the project was checked, as evidenced by the implementation of a digital phase meter by one developer and a cascade of seven-segment code decoders by others. After doing this work, it is easy enough to integrate these projects into one unit to create a digital part of the phase meter on a programmable logic integrated circuit.

Keywords: phase meter, Quartus, Intel, FPGA.

Вступ

В даний час широко застосовуються цифрові вимірювальні прилади, які забезпечують велику точність вимірювань та швидкодію, можливість використання в автоматичному режимі, підвищення надійності, зменшення маси та габаритів. Потреба в цих приладах обумовлена високою потенційною точністю фазових вимірювань і широким використанням фазових принципів у навігації, зв'язку, при проектуванні електронної апаратури і вже безпосередньо в процесі роботи даних приладів.

Впровадження у вимірювальну техніку ПЛІС забезпечує подальший розвиток засобів вимірювання, створення нового покоління програмованих вимірювальних приладів. Вони все частіше стають джерелами даних для автоматизованих систем збирання, обробки, зберігання і відображення вимірювальної інформації. Фазові методи вимірювань знаходять широке застосування в радіотехніці. Інформація, що закладена у фазі, використовується для вимірювання відстаней та просторового розташування об'єкту, визначення параметрів і характеристик матеріалів та середовищ та інше. Точне установлення фазових співвідношень напруг чи струмів, що діють у електричних колах різних пристроїв, забезпечує поліпшення рівня вихідних параметрів електронної апаратури.

Характерною рисою розвитку сучасної техніки є поява нових приладів, таких як цифрові фазометри на ПЛІС. Різноманітні засоби цифрової техніки: ЕОМ, мікропроцесорні системи вимірювань і автоматизації технологічних процесів, цифровий зв'язок, телебачення і т. д. будуються на єдиній елементній базі, до складу якої входять надзвичайно різні по складності мікросхеми – від логічних елементів, що виконують найпростіші операції, до найскладніших програмувальних кристалів, що містять мільйони логічних елементів.

З часу появи цифрових пристроїв ІС постійно вдосконалюються. Характеристикою складності ІС є рівень інтеграції, оцінюваний або числом базових логічних елементів, або числом транзисторів, що можуть бути реалізовані на кристалі. Розходження в рівнях інтеграції ІС поділяють на деякі категорії: МІС, СІС, ВІС, НВІС (відповідно малі, середні, великі і над великі ІС). Практичне використання знаходять всі категорії.

В останні роки відбувся різкий прорив як у технології виготовлення програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС), так і в розробці інструментальних засобів, призначених для проектування

цифрових пристроїв на ПЛІС і випуску готових виробів. Технологічний прорив характеризується різким збільшенням числа еквівалентних логічних вентилів, розташовуваних на одному кристалі, підвищенням робочої частоти з одночасним зниженням як питомої, так і абсолютної вартості. Крім того програмована логіка по темпах розвитку почала випереджати інші напрямки цифрової електроніки (універсальних мікропроцесорів, сигнальних процесорів, мікроконтролерів і НВІС).

Чималу роль в розширенні областей застосування ПЛІС, скороченні часу і зниженні трудовитрат на проектування зіграли і значні успіхи в створенні інструментальних засобів для розробки і випуску кінцевих виробів на ПЛІС, основу яких складають спеціальні пакети програм, що забезпечують весь виробничий цикл по створенню цифрових пристроїв на ПЛІС, від розробки схем до випуску готових виробів.

Отже, метою даної роботи є створення цифрового фазометру, який дає можливість вирішити деякі протиріччя, що виникають при проектуванні даних пристроїв за традиційною розповсюдженою методикою. Проектування даного пристрою передбачає застосування альтернативного підходу, що дає можливість створити цифровий фазометр на ПЛІС з кращими техніко-економічними показниками, тобто отримати краще співвідношення між ціною і якістю [1-2].

Результати дослідження

Із перерахованих вище методів вимірювання фази метод перетворення фазового зсуву в імпульси струму є найкращим для впровадження у виробництво. Тому саме його і візьмемо за основу нашого фазометра.

Із надзвичайно швидким та широким впровадженням у сучасну електроніку інтегральних мікросхем на декілька порядків підвищується точність підрахунків та швидкість обробки результатів. Тому логічно обрати для виготовлення пристрою інтегральні мікросхеми, але з якнайширшими можливостями щоб зменшити кількість елементів. В наш час впроваджуються в пристрої мікроконтролери на основі ПЛІС. Вони представлені надзвичайно широкими модельними рядами різних фірм виробників, але майже всі програмуються за допомогою компіляторів, що використовують для створення файлу прошивки код однієї із мов програмування. Тому краще було б використовувати мікроконтролери, що використовують компілятори, які підтримують можливість створення файлу прошивки на основі принципової схеми пристрою. Це дозволить промодельовати пристрій перш ніж виконувати прошивання мікросхеми і це підвищить надійність при розробці фазометра. Таким вимогам відповідають мікроконтролери фірми Altera MAX7000S та FLEX10K. Програмний пакет Quartus II, що створено для їх прошивки, підтримує в якості початкового файлу як програмний код, так і можливість „збору” принципової схеми [3].

Принцип роботи

В основі методу вимірювання лежить перетворення двох синусоїдальних напруг u_1 і u_2 , фазовий зсув яких потрібно виміряти, в періодичні послідовності коротких імпульсів, що відповідають моментам переходів цих напруг через нуль з похідними однакового знаку (рис. 1). Інтервали часу ΔT між найближчими імпульсами 1 і 2 пропорційні різниці фаз, що визначається (вважається, що напруга u_1 випереджає по фазі напругу u_2). Після перетворення вимірюється відносне значення інтервалу часу (по відношенню до періоду).

Використовуючи відомі вирази $\varphi = \omega \cdot \Delta T$ та $\omega = 2\pi / T$, легко написати формулу, що встановлює зв'язок між фазовим зсувом φ в градусах та відносним інтервалом часу

$$\varphi = 360 \cdot \Delta T / T. \quad (1)$$

Слід відмітити, що перетворення фазового зсуву в інтервал часу супроводжується випадковою похибкою, що обумовлена дією шумових завад. Викладений метод отримав широке розповсюдження і зустрічається в різноманітних фазометрах, що відрізняються один від одного головним чином способом вимірювання відносного інтервалу часу.

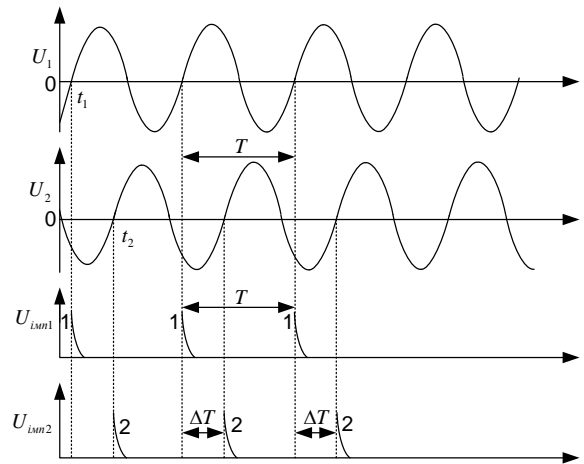


Рисунок 1 – Принцип роботи фазометра

Структурна схема приладу

Структурна схема цифрового фазометра зображена на рис. 2. Вона складається із математичного блоку, двох лічильників, семисегментного перетворювача, вхідного блоку та цифрового індикатора.

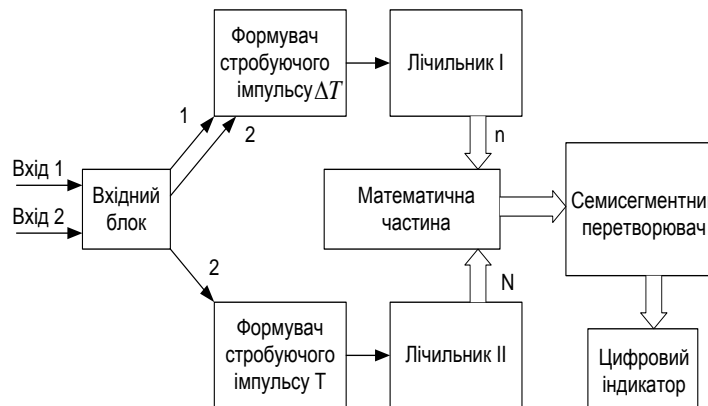


Рисунок 2 – Структурна схема цифрового фазометра

Такий цифровий фазометр, окрім загальних переваг у порівнянні із приладами, що виконані за схемами з жорсткою логікою роботи, володіє ще рядом специфічних „фазометричних” переваг. Суть одної із них у тому, що прилад дозволяє вимірювати фазові зсуви за один період досліджуваної напруги. Для пояснення принципу такого вимірювання скористаємось графіками, представленими на рис. 3.

Синусоїдальні напруги u_1 та u_2 , фазовий зсув між якими потрібно виміряти, перетворюється у короткі одно полярні імпульси (рис. 3. а-в). Із першої пари імпульсів 1 та 2 в приладі формується стробуючий імпульс тривалістю ΔT (рис. 3, г). За допомогою лічильника I підраховується кількість імпульсів квантування, що вміщуються в тривалість ΔT (рис. 3, д)

$$n = F_{\text{ліч}} \cdot \Delta T, \quad (2)$$

де $F_{\text{ліч}}$ - частота імпульсів квантування.

Паралельно формується стробуючий імпульс тривалістю, рівною періоду досліджуваної синусоїдальної напруги (рис.3, а, в, е). Цей стробуючий імпульс подається на лічильник II та заповнюється лічильними імпульсами з тією ж частотою $F_{\text{ліч}}$. Число імпульсів, підрахованих лічильником II за період T (рис.3, ж)

$$N = F_{\text{ліч}} \cdot T. \quad (3)$$

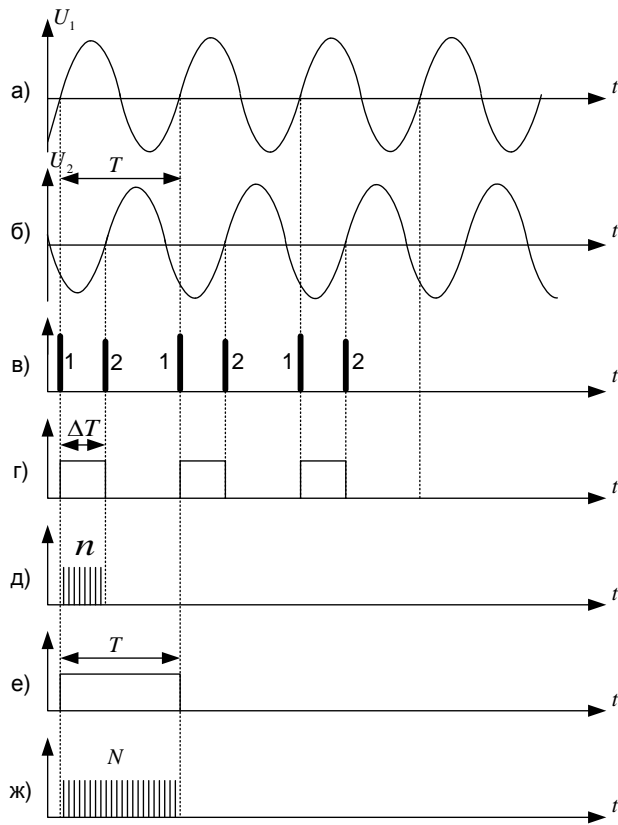


Рисунок 3 – Принцип роботи цифрового фазометра

Числа n та N передаються із лічильників I та II в математичний блок, де вираховується відношення n/N . Після множення відношення на 360, як видно з співставлення (2) та (3) з (1), отримуємо шукане значення фазового зсуву

$$\varphi = 360 \cdot n / N. \quad (4)$$

Описаним фазометром можливо виміряти фазові зсуви за q періодів. При цьому в лічильнику I накопичуються числа імпульсів, що заповнюють q інтервалів ΔT , а лічильник II фіксує число імпульсів, що потрапляють на інтервал qT [4].

Апаратна реалізація

Формувач сторбуючого імпульсу ΔT реалізовано в Quartus II за допомогою графічного редактора. Електрична схема наведена на рис. 4.

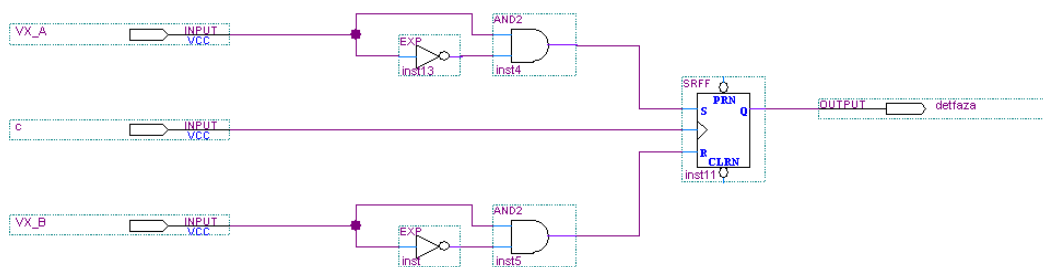


Рисунок 4 – Електрична схема формувача сторбуючого імпульсу ΔT

Наведемо пояснення до схеми. На входні контакти VX_A та VX_B подаються сигнали з виходу вхідного блоку, а на вхід C подаються синхроімпульси (ті ж квантуючі імпульси, що подаються на лічильник для n та N). Елементи EXP та AND2 детектують початок фронту для того, щоб не

утворювалась заборонена комбінація на входах тригера. Результат моделювання діаграм представлено на рис. 5.

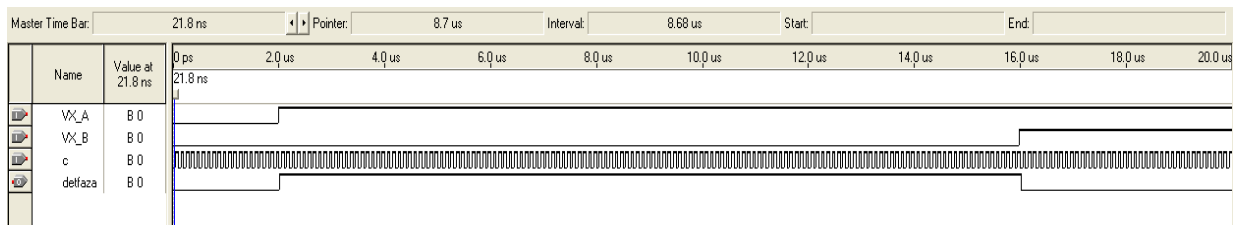


Рисунок 5 – Моделювання роботи формувача стробуючого імпульсу ΔT

Формувач стробуючого імпульсу T реалізовано в Quartus II за допомогою графічного редактора. Електрична схема наведена на рис. 6.

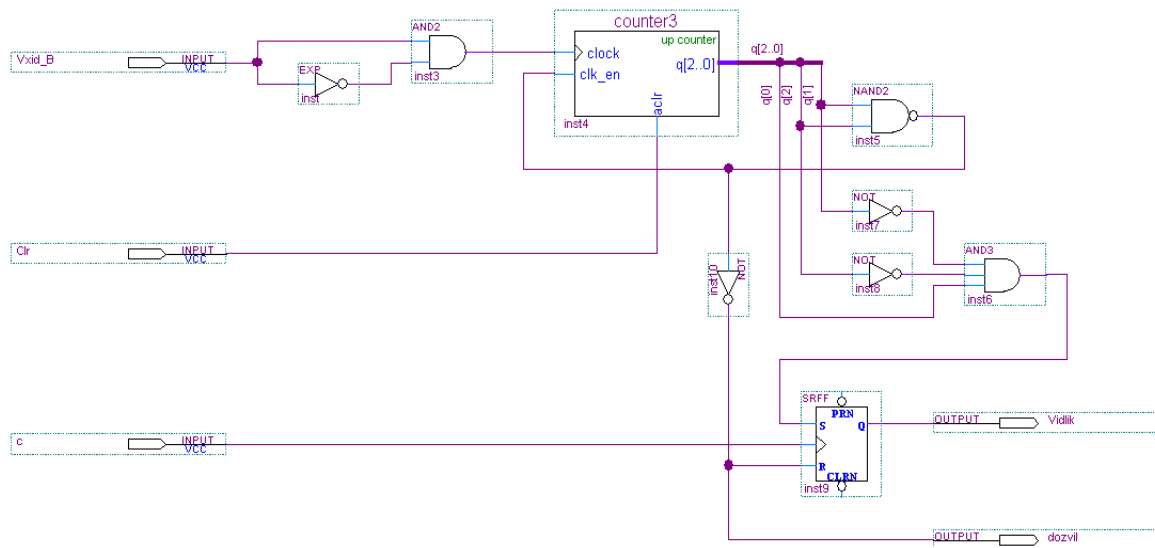


Рисунок 6 – Електрична схема формувача стробуючого імпульсу $T \cdot 5$

Наведемо пояснення до схеми. На вхідний контакт VX_B подаються сигнали з виходу вхідного блоку, а на вхід С подаються синхроімпульси (ті ж квантуючі імпульси, що подаються на лічильник для n та N). Вхід Clr призначений для скидання лічильника. Вихід dozvil призначений для подавання сигналу закінчення підрахунку. Результат моделювання діаграм представлено на рис. 7.

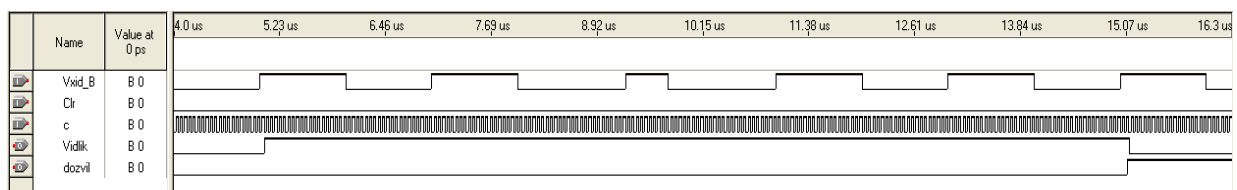


Рисунок 7 – Моделювання роботи формувача стробуючого імпульсу $T \cdot 5$

Лічильник для підрахунку реалізуємо за допомогою чотирьох декадних лічильників. Електрична схема наведена на рис. 8.

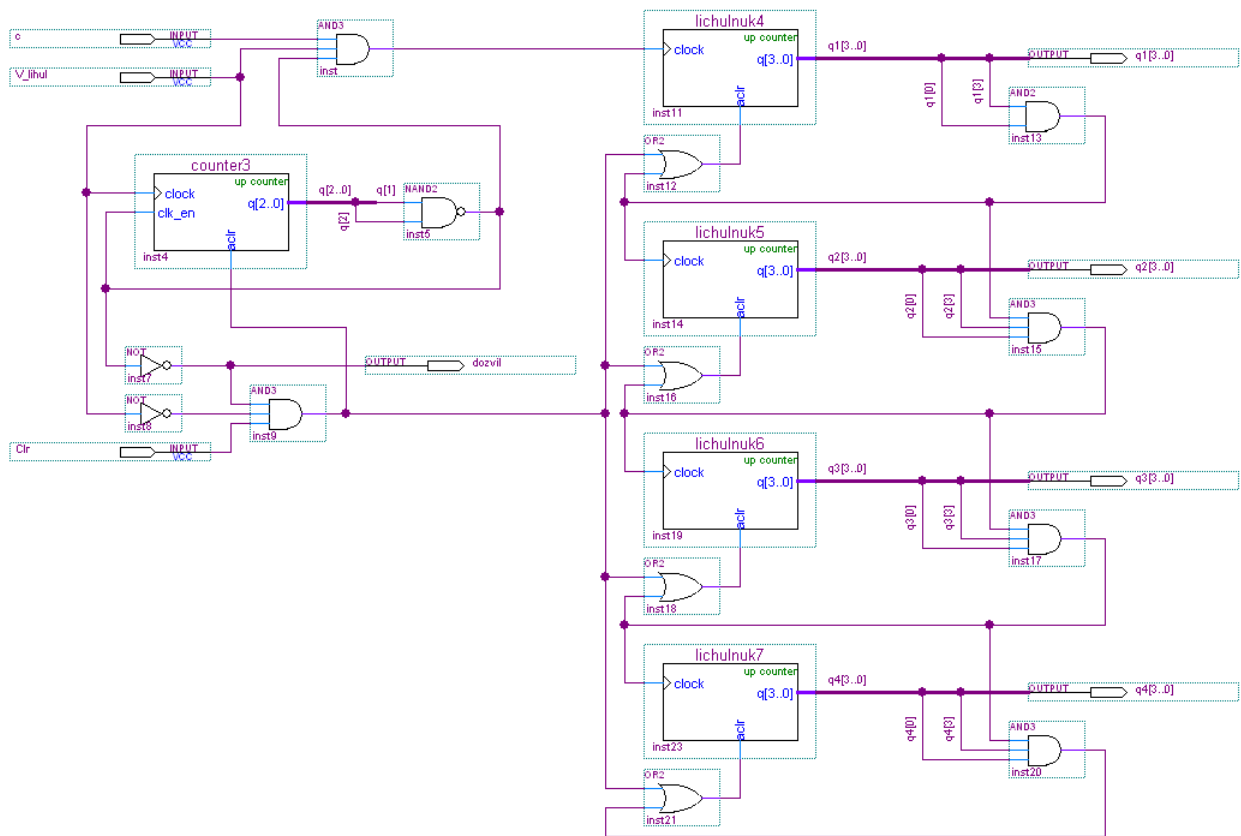


Рисунок 8 – Електрична схема лічильника для підрахунку n

Наведемо пояснення до схеми. На вхідний контакт V_Lihul подаються сигнали з виходу формувача стробуючих імпульсів ΔT , а на вхід C подаються синхроімпульси. Вхід Clr призначений для скидання лічильників. Вихід dozvil призначений для подавання сигналу закінчення підрахунку. Ще один додатковий лічильник призначений для того, щоб підсумувати п'ять імпульсів ΔT . Результат моделювання діаграм представлено на рис. 9. В результаті моделювання видно, що $n = 4855$.

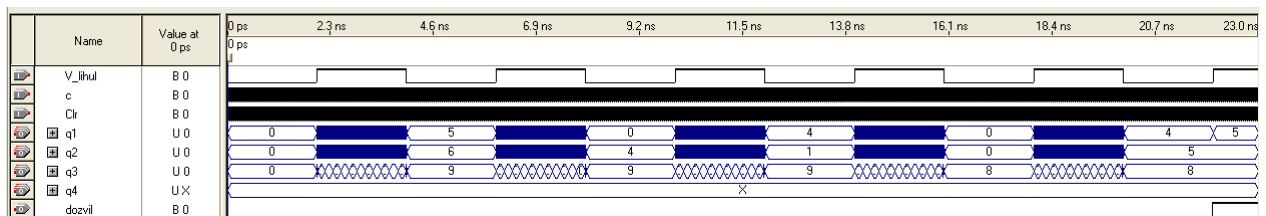


Рисунок 9 – Моделювання роботи лічильника

Лічильник для підрахунку реалізуємо за допомогою чотирьох декадних лічильників. Електрична схема наведена на рис. 10.

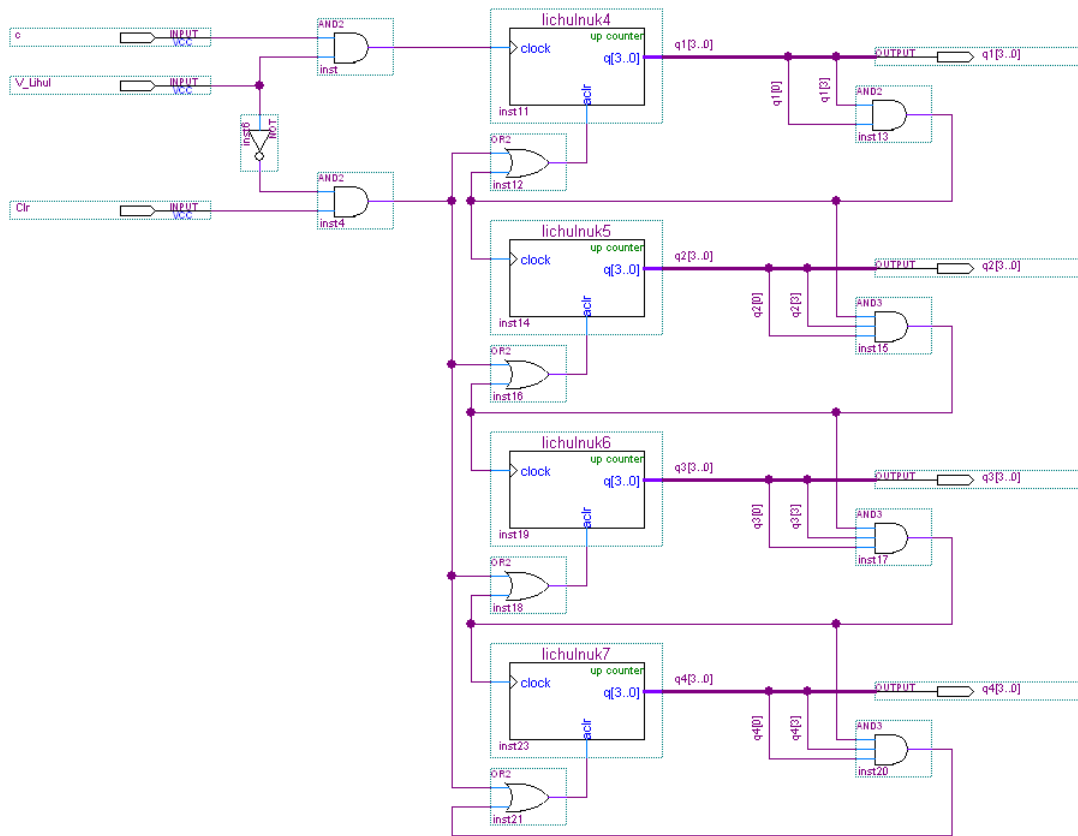


Рисунок 10 – Електрична схема лічильника для підрахунку N

На вхідний контакт V_Lihul подаються сигнали з виходу формувача стробуючих імпульсів T, а на вхід C подаються синхроімпульси. Вхід Clr призначений для скидання лічильників. Вихід dozvil призначений для подавання сигналу закінчення підрахунку. Ще один додатковий лічильник призначений для того, щоб підсумувати п'ять імпульсів ΔT . Результат моделювання діаграм представлено на рис. 11. В результаті моделювання видно, що $N = 9661$.

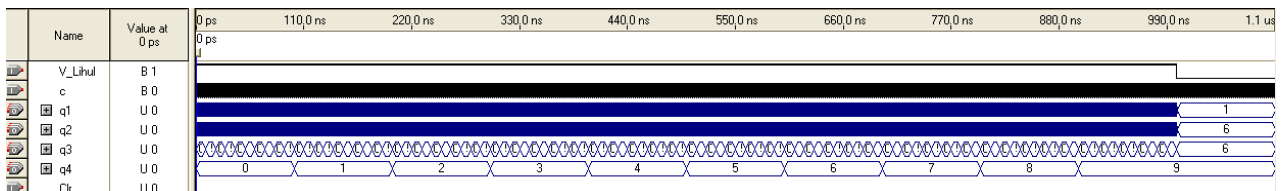


Рисунок 11 – Моделювання роботи лічильника

Завданням даної математичної частини є помноження даних елемента li4ulnuk_10 на 360 і ділення цього результату на значення, отримані з елемента li4ulnuk_10_2. Електрична схема наведена на рис. 12.

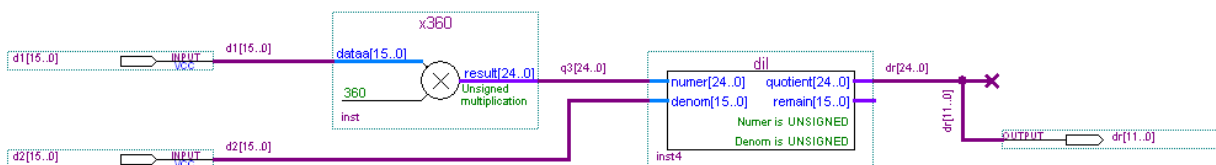


Рисунок 12 – Електрична схема математичної частини

Наведемо пояснення до схеми. На вхідний контакт d1[15...0] подаються дані з лічильника li4ulnuk_10, на контакт d2[15...0] подаються дані з лічильника li4ulnuk_10_2, на виході dr[11...0] формується значення шуканого зсуву фаз [5, 6].

Висновки

Також було виконано реалізацію пристрою безпосередньо на мікросхемі, та цілком вдало пройшло моделювання розробки за допомогою симулятора та матриці затримок, які підтвердили вірність розрахунків та проектування пристрою загалом. Було доведено також про цілковиту реальність створення цифрового фазометра даного типу, при наявності потрібних матеріалів та засобів.

Недоліком даного пристрою є порівняно невисока точність цифрового фазометра. Проте таке спрощення схеми являється прийнятним у зв'язку із значним зменшенням ціни пристрою.

Також, що є суттєвим для вимірювальної техніки, зменшується в декілька разів собівартість пристрою. Ще одною із переваг такої реалізації фазометра є низька потужність споживання та застосування сучасних програмованих логічних інтегральних схем.

До недоліків слід віднести шуми квантування та похибка, яка виникає через неспівпадання квантуючого імпульсу із початком (чи закінченням пускового сигналу тригера). Проте перший недолік вдається згладити шляхом методу усереднення результатів. За таким методом потрібно виконати декілька вимірювань, а потім просумувавши результат поділити його на кількість цих вимірювань. Таким чином буде отримано середнє значення, яке наближатиметься до ідеального з наближенням кількості вимірювань до нескінченності. В роботі прийнято, що достатньою кількістю для заданих режимів точності являється число вимірювань, в одному циклі – п'ять раз [7 – 9].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кофанов В. Л. Лабораторний практикум з цифрових пристроїв на основі САПР Quartus II [Текст] : навчальний посібник / В. Л. Кофанов, О. В. Осадчук, Д. В. Гаврілов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 167 с.
2. Кофанов В. Л. Лабораторний практикум з дослідження цифрових пристроїв на основі САПР MAX+PLUS II [Текст] : лабораторний практикум / В. Л. Кофанов, О. В. Осадчук, Д. В. Гаврілов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 200 с.
3. D. Havrilov, S. Baraban, A. Volovyk, O. Zviahin, A. Semenov and A. Savvitskiy, "Real-Time Video Processing System based on Field Programmable Gate Array," 2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 192-196. doi: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929758.
4. Гаврілов Д. В., Воловик А. Ю., Звягін О. С., Яровий Д. В. Реверсивний генератор кодових послідовностей на FPGA // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2019, № 4. (145). С. 100-107. DOI 10.31649/1997-9266-2019-145-4.
5. Воловик А. Ю., Гаврілов Д. В. Апроксимація розширеного фільтра Калмана паралельною двокаскадною структурою // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2019, № 4. (145). С. 107-116. DOI 10.31649/1997-9266-2019-145-4.
6. Воловик А.Ю., Гаврілов Д.В., Мозговий В.С. Розробка моделі траєкторних спостережень для авіаційної посадкової системи // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2018, № 6. Т.1 (267). С. 173-182. DOI 10.31891/2307-5732-2018-267-6(1)-173-182.
7. Гаврілов Д.В., Воловик А.Ю., Гаврілова Н.М., Кофанова Н.В., Яровий Д.В. Універсальний реєстр на ПЛІС // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2019, № 2 (271). С. 188-191. DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-188-191.
8. Гаврілов Д.В., Гаврілова Н.М., Кофанов В.Л., Яровий Д.В. Універсальний реєстр зсуву на ПЛІС. Патент. Пат. 136163 Україна, МПК G11C 19/00 (2006.01). №u201901336; Заявл. 11.02.2019; Опубл. 12.08.2019, – 6 с.
9. Гаврілов Д.В., Яровий Д.В. «Реверсивний генератор кодових послідовностей на FPGA» в Матеріали конференції «XLVIII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2019)», Вінниця, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/frtzip_2019_netpub.pdf Дата звернення: Черв. 2019.

Гаврілов Дмитро Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: havrilov@vntu.edu.ua

Кобися Микола Володимирович — студент групи РТ-18м, факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: mkobysya@gmail.com

Havrilov Dmytro — Cand. Sc. (Eng), Associate Professor of the Department of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: havrilov@vntu.edu.ua

Kobysia Mykola — student of the Faculty of Infocommunications, Radioelectronics and Nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: mkobysya@gmail.com