

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЄМНІСТІ - ЧАСОВИЙ ІНТЕРВАЛ – ДВІЙКОВИЙ КОД НА БАЗІ ІНТЕГРАЛЬНОГО ТАЙМЕРА ТА ЦИФРОВОГО ЛІЧИЛЬНИКА В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MICROCAP

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено розробку та дослідження математичної моделі вимірювального перетворювача ємності вібросенсора у двійковий код за допомогою проміжного перетворення у часовий інтервал. Схему реалізовано на базі інтегрального таймера NE555 у режимі одновібратора та цифрового лічильника. Визначено метрологічні параметри елементів схеми, обґрунтовано вибір частоти дискретизації (2 кГц) та тривалості пускового імпульсу (5 мкс) відповідно до критерію Котельникова для дослідження низькочастотних вібрацій промислового обладнання. Проведено комп'ютерне моделювання у програмному середовищі MicroCap, яке підтвердило високу лінійність характеристики перетворення у діапазоні ємностей від 1 до 20 нФ, що відповідає кодовим значенням від 11 до 220. Отримані результати дозволяють інтегрувати перетворювач у стандартні 8-розрядні мікропроцесорні системи збору даних без ризику переповнення.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач, інтегральний таймер, двійковий лічильник, вібросенсор, комп'ютерне моделювання, MicroCap, ємність, часовий інтервал, двійковий код.

Abstract

The paper presents the development and analysis of a mathematical model for a measuring converter designed to transform the capacitance of a vibration sensor into a binary code via an intermediate time interval. The circuit is implemented based on the NE555 integrated timer operating in a monostable multivibrator mode and a digital counter. The metrological parameters of the circuit elements are determined, and the selection of a 2 kHz sampling rate and a 5 μ s trigger pulse duration is justified according to the Nyquist–Shannon sampling theorem for monitoring low-frequency vibrations of industrial equipment. Computer simulation within the MicroCap software environment has confirmed high linearity of the conversion characteristic across a capacitance range from 1 to 20 nF, corresponding to digital code values from 11 to 220. The obtained results enable seamless integration of the converter into standard 8-bit microprocessor data acquisition systems without the risk of counter overflow.

Keywords: measuring converter, integrated timer, digital counter, vibration sensor, computer simulation, MicroCap, capacitance, time interval, binary code.

Вступ

Надійність роботи сучасного промислового обладнання безпосередньо залежить від ефективності систем автоматизованого моніторингу технічного стану, де одним із ключових параметрів є рівень механічних вібрацій. Відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ ІСО 10816-3:2014 [1], постійне контролювання стану машин за результатами вимірювання вібрації дозволяє попередити аварійні ситуації та оптимізувати міжремонтні інтервали.

Найважливішим вузлом таких систем є вимірювальні перетворювачі, які забезпечують первинне зняття інформації з вібросенсорів ємнісного типу та її трансформацію у цифровий вигляд для подальшої обробки в EOM або SCADA-системах. Проте традиційні схеми на базі дискретних компараторів часто мають високу чутливість до температурних коливань та завад, що призводить до дрейфу порогів спрацювання та похибок вимірювання в реальних умовах виробництва.

Ефективним розв'язанням цієї проблеми є використання спеціалізованих інтегральних схем таймерів, які мінімізують температурний дрейф, та реалізація методу заповнення часового інтервалу еталонною частотою. Метою даної роботи є розробка, обґрунтування параметрів та дослідження методом комп'ютерного моделювання в середовищі MicroCap математичної моделі лінійного перетворювача «ємність – часовий інтервал – двійковий код» для низькочастотного вібромоніторингу промислових об'єктів.

Основна частина

У даній модифікації перетворювача центральним елементом є мікросхема інтегрального таймера X10 (NE555), увімкнена за схемою одновібратора. На відміну від дискретних компараторів, використання спеціалізованої інтегральної схеми дозволяє мінімізувати температурний дрейф порогів спрацювання, що є критичним при вимірюванні вібрації.

Структурна схема перетворювача ємність - часовий інтервал – двійковий код на базі інтегрального таймера та цифрового лічильника показана на рис. 1.

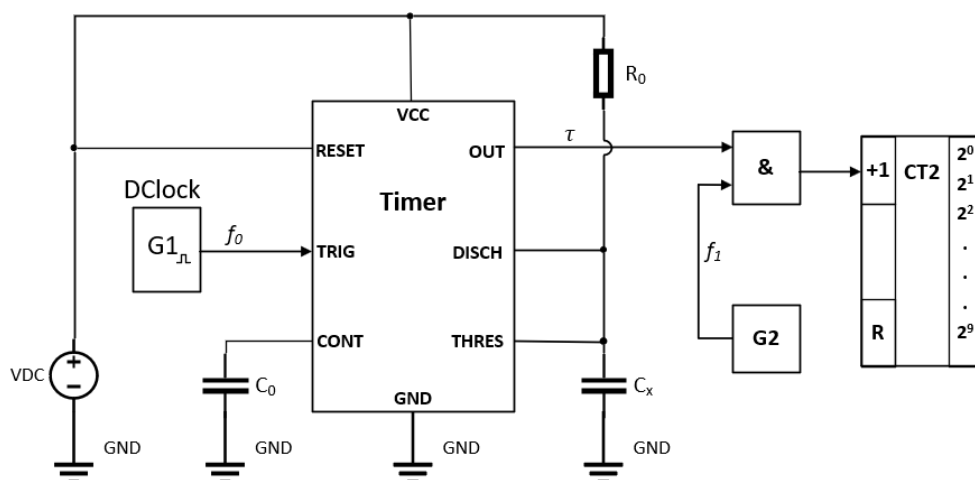


Рис. 1. Структурна схема перетворювача ємність - часовий інтервал – двійковий код на базі інтегрального таймера та цифрового лічильника

Основними компонентами такої схеми є:

- VDC – джерело живлення 5В;
- G1 – джерело запуску (DClock);
- G2 – жерело тактових імпульсів;
- R0 – прецизійний резистор (10 кОм);
- Cx – ємність вібросенсора (Cx);
- C0 – блокувальний конденсатор (10 нФ);
- Timer – інтегральний таймер;
- & – логічний елемент «І»;
- CT2 – двійковий лічильник.

Процес формування інтервалу наступний:

1) Вхідний імпульс запуску від джерела G1 надходить на вхід TRIG (вивід 14) інтегрального таймера Timer.

Варто зауважити, що оскільки досліджувана величина (вібрація) є динамічним процесом, частота циклів вимірювання f_0 (що визначається генератором запуску G1) повинна задовольняти критерію Котельникова. Для адекватного відновлення спектру вібраційного сигналу необхідно, щоб $f_0 > 2 f_{max}$ де f_{max} — максимальна гармоніка в спектрі механічних коливань об'єкта дослідження. Тому параметри джерела запуску G1 обрані з розрахунку на вимірювання низькочастотних вібрацій промислового обладнання (з частотним спектром до 500 Гц). Встановлена частота дискретизації

2 кГц забезпечує необхідний чотирикратний запас, що дозволяє не лише уникнути ефекту накладання частот, але й гарантує високу точність цифрової реконструкції форми сигналу вібросенсора в режимі реального часу. Це забезпечує достовірність подальшого аналізу технічного стану обладнання.

Особлива увага приділена тривалості пускового імпульсу. Параметр ZEROWIDTH встановлено на рівні 5 мкс. Таке рішення є метрологічно обґрунтованим, оскільки тривалість запуску (5 мкс) є меншою за мінімально можливий час заряду сенсора (11 мкс при 1 нФ), що гарантує автономність формування вимірювального стробу таймером, а також виключається залежність результату вимірювання від часової нестабільності самого пускового сигналу.

2) Попередній крок ініціює заряд досліджуваної ємності вібросенсора C_x через прецизійний резистор $R_0=10$ кОм.

3) Вихід OUT (вивід 15 таймера) переходить у стан високого логічного рівня на час τ . Для нашого діапазону $1 \dots 20$ нФ цей інтервал становить $11 \dots 220$ мкс.

Для перетворення отриманого аналогового інтервалу τ у цифровий еквівалент використано метод заповнення (квантування) імпульсами еталонної частоти.

4) Сигнал з виходу таймера подається на один із входів логічного елемента «І» (&). На другий вхід елемента надходить послідовність прямокутних імпульсів від тактового генератора G2. Логічна одиниця на виході таймера виконує роль «часового вікна» (стробу):

- поки на виході таймера «1», тактові імпульси проходять на вихід 18 елемента &.

- як тільки напруга на C_x досягає $2/3$ напруги живлення, таймер перемикається, і проходження імпульсів припиняється.

Варто зауважити, що для отримання високої роздільної здатності тактовий генератор G2 налаштований на формування імпульсів з періодом 1 мкс ($ZEROWIDTH=0.5\mu$, $ONEWIDTH=0.5\mu$). Це забезпечує наступні характеристики цифрового виходу:

- кількість накопичених імпульсів N у лічильнику CT2 чисельно дорівнює тривалості інтервалу в мікросекундах.

- при ємності 1 нФ на виходах QA...QG фіксується код $N \approx 11$.

- при максимальній ємності 20 нФ значення коду становить $N \approx 220$.

Така конфігурація дозволяє використовувати стандартні 8-розрядні системи збору даних без ризику переповнення лічильника, забезпечуючи при цьому лінійну характеристику перетворення по всьому діапазону вимірювань.

5) Кінцевим етапом перетворення є інтегрування кількості імпульсів двійковим лічильником CT2. Вихідний код знімається з паралельних шин QA–QG (виводи 19–25).

Адекватність розробленої моделі вимірювального перетворювача ємність - часовий інтервал – двійковий код на базі інтегрального таймера та цифрового лічильника підтверджено комп'ютерним моделюванням в програмному середовищі MicroCap (рис. 2).

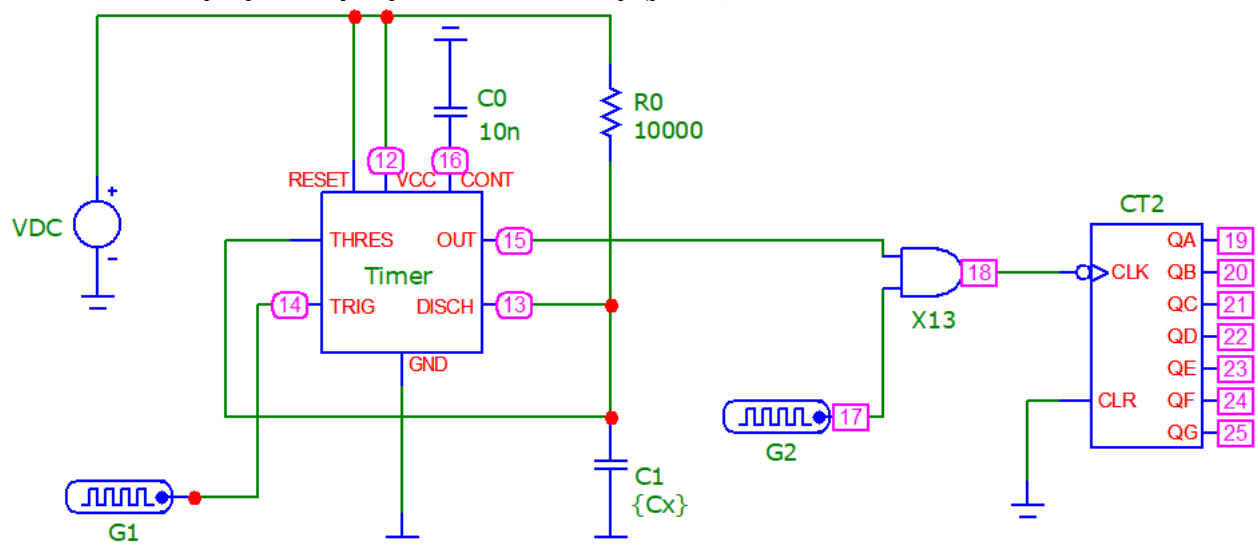


Рис. 2. Схема перетворювача ємність - часовий інтервал – двійковий код на базі інтегрального таймера та цифрового лічильника в програмному середовищі MicroCap

Часові діаграми роботи такого перетворювача в програмному середовищі MicroCap при зміні ємності від 1 до 20 нФ показані на рис. 3 (а, б, в).



Рис. 3 (а). Часові діаграми роботи перетворювача ємність - часовий інтервал – двійковий код при ємності $C_x=1\text{нФ}$

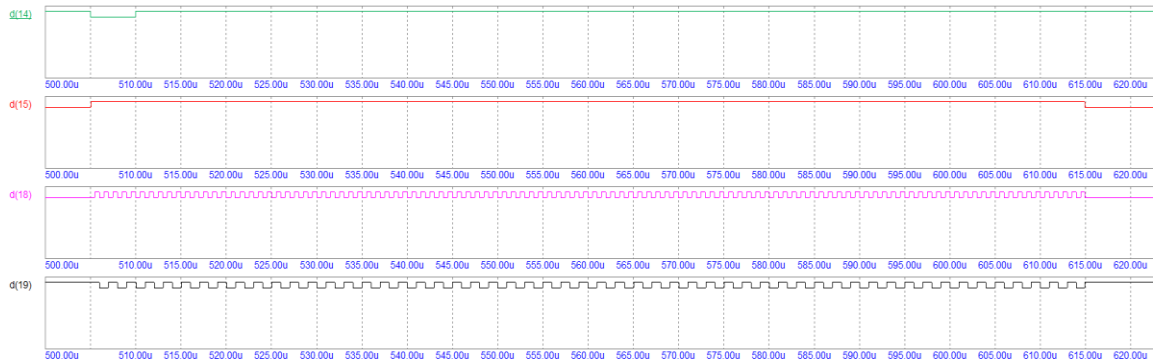


Рис. 3 (б). Часові діаграми роботи перетворювача ємність - часовий інтервал – двійковий код при ємності $C_x=10\text{нФ}$

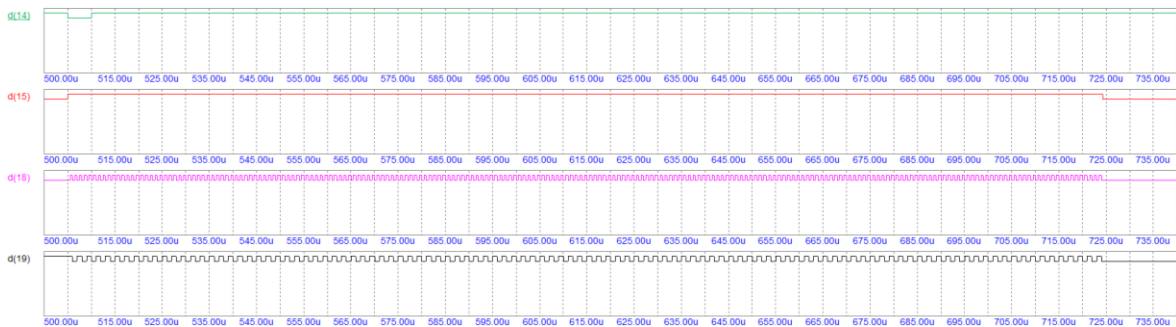


Рис. 3 (в). Часові діаграми роботи перетворювача ємність - часовий інтервал – двійковий код при ємності $C_x=20\text{нФ}$

На діаграмах результатів моделювання чітко видно взаємозв'язок між сигналом запуску $d(14)$ та пачками імпульсів $d(18)$, що надходять на лічильник. Тривалість сигналу $d(15)$ є прямо пропорційною значенню ємності C_x . Отриманий двійковий код N на виходах $d(18)$, $d(19)$... є готовим значенням для подальшого зчитування паралельним портом ЕОМ або мікропроцесорної системи.

Графік залежності кількості імпульсів N на виході з перетворювача від значення ємності C_x показано на графіку (рис. 4).

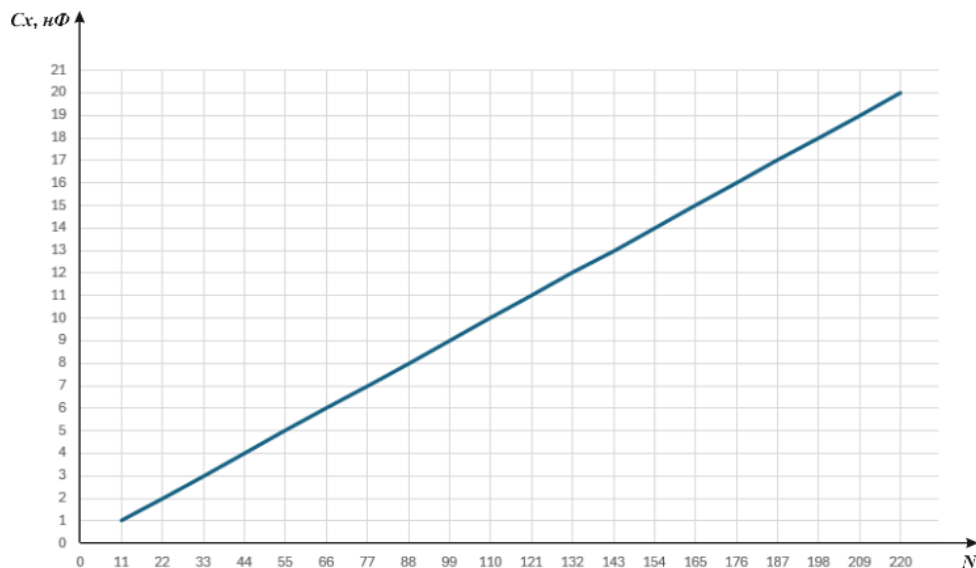


Рис. 4. Графік залежності кількості імпульсів N на виході з перетворювача від значення ємності C_x

Висновки

Розроблено та математично обґрунтовано структурну схему вимірювального перетворювача ємності вібросенсора у двійковий код, головною перевагою якої є мінімізація температурного дрейфу порогів спрацювання завдяки використанню інтегрального таймера NE555 у режимі одновібратора.

На основі критерію Котельникова обґрунтовано параметри генератора запуску: встановлена частота дискретизації 2 кГц забезпечує чотирикратний запас для адекватного відновлення форми низькочастотних вібросигналів (до 500 Гц), а тривалість пускового імпульсу 5 мкс гарантує незалежність результату вимірювання від часової нестабільності сигналу запуску.

За допомогою комп'ютерного моделювання у програмному середовищі MicroCap підтверджено працездатність моделі та отримано часові діаграми для діапазону ємностей C_x від 1 до 20 нФ. Доведено, що вихідний двійковий код лінійно залежить від вимірюваної ємності й змінюється в межах $N = 11 \dots 220$. Це дозволяє підключати перетворювач безпосередньо до паралельних портів стандартних 8-розрядних мікропроцесорних систем без ризику переповнення лічильника.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ ГОСТ ІСО 10816-3:2014 Вібрація. Контролювання стану машин за результатами вимірювання вібрації на необертюваних частинах. Частина 3. Промислові машини номінальною потужністю більше ніж 15 кВт і номінальною швидкістю від 120 хв-1 до 15000 хв-1 (ГОСТ ІСО 10816-3-2002, MOD; IDT).
2. Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. C05468-0-4/05(0) 2005. www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7745_7746.pdf
3. О.В. Осельський, В.В. Кухарчук, "Математична модель вимірювального перетворення віброзміщення ємнісним сенсором в часовий інтервал", Фахове видання МОНУ Вісник Вінницького політехнічного інституту, №2 (173), с. 6-13, 2024. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-6-13>
4. Designing With the SN74LVC1G123 Monostable Multivibrator / Texas Instruments. — SLVA720A. — 2015. — 16 p. — Режим доступу: <https://docslib.org/doc/7941506/designing-with-the-sn74lvc1g123-monostable-multivibrator-rev-a>
5. Darji C. P. Design of Pulse Width Modulator Using NE-555 : technical report / Dharmsinh Desai University. — Nadiad, 2020. — 20 p. https://www.researchgate.net/publication/347574141_DESIGN_OF_PULSE_WIDTH_MODULATOR_USING_NE-555
6. В.В. Кухарчук, Основи метрології та електричних вимірювань. Частина II : конспект лекцій / В. В. Кухарчук – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 154 с. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Kuharchuk_P2_2022_122.pdf

Осельський Олександр В'ячеславович – аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця; провідний інженер з автоматизованих систем керування виробництвом, ТОВ «КСК-Автоматизація» Вінницька філія, м. Вінниця, e-mail: oselskyi.ov@gmail.com

Науковий керівник: **Василь Васильович Кухарчук** - професор, д.т.н., професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Osel'skyi Oleksandr V – postgraduate Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia; leading engineer for automated production control systems, «CSC-Automation» Ltd Vinnytsia branch, Vinnytsya, e-mail: oselskyi.ov@gmail.com

Supervisor: ***Vasyl V Kukharchuk*** - Professor, Dr Sc. (Eng.), Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.