

СПОСІБ БАГАТОШКАЛЬНОГО ЗБІГУ ІМПУЛЬСІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТИМЧАСОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВІД РУХОМОГО СКЛАДУ МОСТІВ ТА ШЛЯХОПРОВОДІВ

Левтеров А. І.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто спосіб багатошкального збігу імпульсів для вимірювання тимчасових навантажень від рухомого складу мостів та шляхопроводів із застосуванням оптичних лазерних систем, що розгортаються. Як перетворювачі вимірюваної інформації у цифрову форму про параметри об'єктів використовується аналого-цифровий перетворювач «аналог- час-код». **Ключові слова:** рухомий склад, міст, шляхопровід, оптична система, що розгортається, лазер, коліматор, фотоприймач, секційна лінія затримки, багатошкальний збіг імпульсів.

Вступ

Застосування автоматизованої системи моніторингу деформацій (АСДМ) на мосту дозволяє оперативно контролювати стан мостової конструкції, зміщення та прогини, що виникають як результат зовнішніх природно-кліматичних впливів, а також інтенсивного транспортного навантаження [1].

На сьогодні для контролю та прогнозування стану мостової конструкції з застосуванням АСДМ використовують оптичні методи вимірювання деформації. За допомогою різноманітних оптичних систем вимірювання деформацій об'єктів різної протяжності мають високу точність і наочність. Мости зазвичай є складними динамічними системами. В усьому світі спостерігається тенденція до збільшення довжини прогонових будов мостів та застосування гнучких конструкцій, що робить ці споруди ще більш залежними від динамічних навантажень.

Аналіз публікацій

Геометричні системи розгортання (РС), подібні до описаної в [2], можуть бути основним елементом вимірювання деформацій об'єктів великої протяжності та вимірювання тимчасових навантажень від суцільного транспортного потоку з неперіодичним тривалим навантаженням прогонових будов мостів та шляхопроводів [3].

На основі таких систем розроблена певна кількість пристроїв, які містять n послідовно розташованих датчиків деформації, жорстко закріплених на конструкції, що деформується, та лазерного сканувального (розгортального) випромінювання для обігу цих датчиків деформації [4–6].

Під час руху суцільного транспортного потоку з неперіодичним тривалим навантаженням автодорожніх мостів і руху поїздів вздовж залізничного мосту конструктивні елементи мостів будуть коливатись. Ці коливання на Рис. 1 і Рис. 2. зображені невідсвіченими імпульсами: зліва – нижня амплітуда коливання, справа – верхня амплітуда коливання

Обчислення експлуатаційного навантаження автодорожніх та залізничних мостів здійснюють на пристрої з огляду на статичні деформації Δl_i , які пропорційні відповідним Δt_i (Рис. 1 і Рис. 2.) [3], у цьому випадку обчислюються окремо нижня та верхня амплітуди коливань мостової конструкції. На рис. 1 наведено t_{i-1n} для обчислення нижньої амплітуди коливань без статичної деформації (для верхньої амплітуди коливань це t_{i-1e} , тобто час розгортання лазерного променя до правого невідсвіченого імпульсу).

На рис. 2 наведено $t'_{i'e}$ для обчислення верхньої амплітуди коливань з деформацією і $t'_{i'n}$, для нижньої амплітуди коливань, тобто час розгортання лазерного променя до лівого невідсвіченого імпульсу). Положення невідсвічених імпульсів на рис. 1 та рис. 2 відповідає одному періоду обертання лазерного променя за відповідними датчиками.

Як перетворювачі вимірюваної інформації в цифрову форму про параметри об'єктів використовуються АЦП «аналог-час-код», «аналог-частота-код» і «аналог-фаза-код». АЦП як новий напрям техніки перетворення інформації сформувався ще у 70–80 роки минулого століття [7].

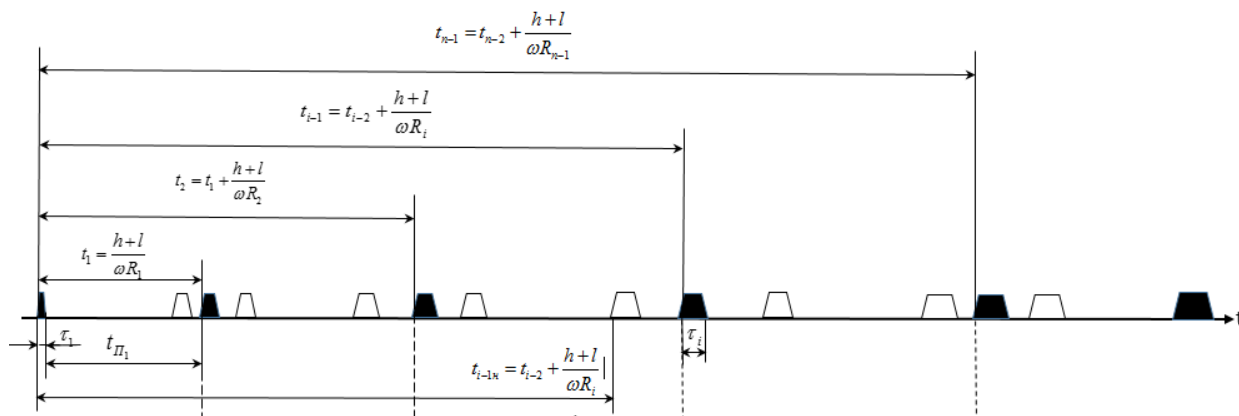


Рис. 1. Часові діаграми роботи пристрою з динамічним навантаженням мостів без деформації конструкції

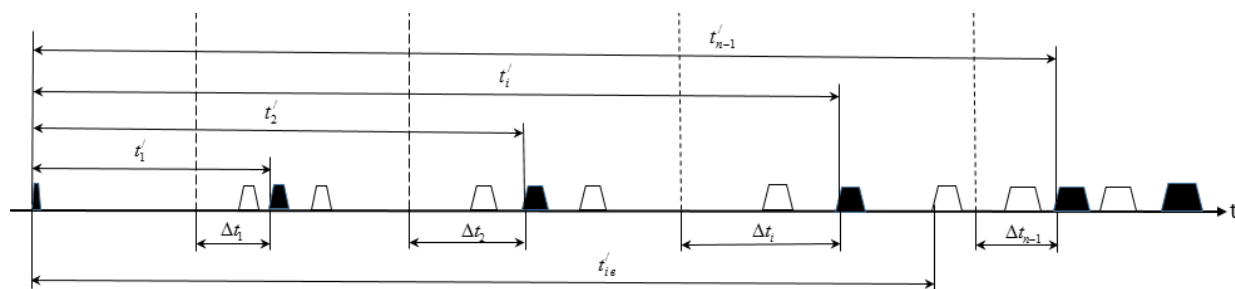


Рис. 2. Часові діаграми роботи пристрою з динамічним навантаженням мостів з деформацією конструкції

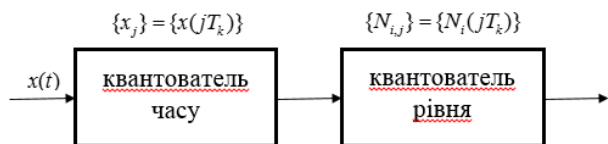


Рис. 3. Функціональна схема АЦП

Вхід АЦП отримує аналоговий сигнал $x(t)$, який, пройшовши крізь квантователь часу, перетворюється на послідовність вибірок $x(jT_k)$. Квантователь рівня перетворює цю послідовність на послідовність кодів $N_i(jT_k)$, де індекс i відповідає i -му рівню (рис.3).

Нині продовжує розвиватися і вдосконалюватися АЦП щодо напрямку їхньої швидкодії, перешкодозахищеності, точності та мікромініатюризації [8].

Як перетворювачі вимірюваної інформації в цифрову форму про параметри об'єктів ми будемо використовувати АЦП «аналог-часкод».

Для вимірювання малих одноразових та періодичних тимчасових інтервалів, тривалість яких значно змінюється від періоду до

періоду, використовують метод звичайного квантування тимчасового інтервалу імпульсами високої частоти, метод ноніуса та методами з використанням схем з лініями затримки [7–9].

Необхідно зазначити, що незалежно від того, як реально задається вимірюваний часовий інтервал (тривалістю імпульсу, періодом повторення імпульсів або їхньою скважністю), можна завжди прийняти, що початок і кінець його задаються короткими «Старт» і «Стоп»-імпульсами.

У [9] проаналізовано метод затриманих збігів для вимірювання малих тимчасових інтервалів, зміст якого полягає в затримці імпульсу початку вимірюваного тимчасового інтервалу (старт-імпульс) й індикації моменту збігу, затриманого секційною лінією затримки цього імпульсу з імпульсом закінчення вимірюваного тимчасового інтервалу (стоп-імпульсом).

Недоліком методу затриманих збігів є прямопропорційна залежність між точністю вимірювання тимчасового інтервалу та складністю пристрою, викликаною кількістю каналів вимірювань, що дорівнює кількості секцій у лінії затримці.

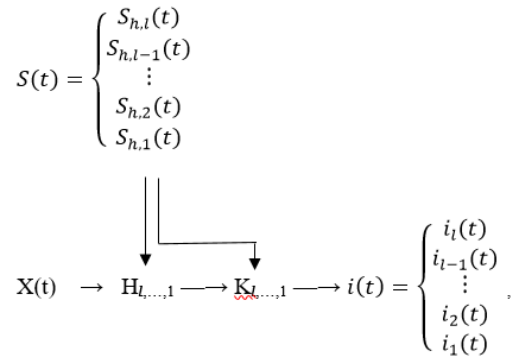
Мета і постановка завдання

Метою статті є вимірювання амплітуди коливань мостової споруди від тимчасових навантажень рухомих складом з неперіодичним тривалим навантаженням оптичними методами. Відповідно до мети необхідно розробити методику та пристрій для вимірювання амплітуди коливань мостової споруди через перетворення амплітуди коливань у тимчасові інтервали та їх подальше вимірювання способом багатоскального збігу імпульсів.

Побудова вимірювальної системи

У роботі [2] детально розглянуті цифрові системи розгортання, які застосовують системи числення з різною основою, що представлені розгортальними функціями.

Такі цифрові системи у загальному вигляді описуються операційною схемою:



де $X(t)$ – перетворена безперервна функція; $S_{h,l}(t), \dots, S_{h,1}(t)$ – група розгортальних кодувальних функцій, якщо основа коду $h = var$, а кількість розрядів l ; $H_{l,\dots,1}$ – нуль-органи; $K_{l,\dots,1}$ – ключі для пропускання імпульсів $i(t)$; $i_l(t), \dots, i_1(t)$ – кодоімпульсне відображення значень $x(t)$.

За цією операційною схемою і був розроблений спосіб багатоскального збігу для вимірювання тимчасових інтервалів [10].

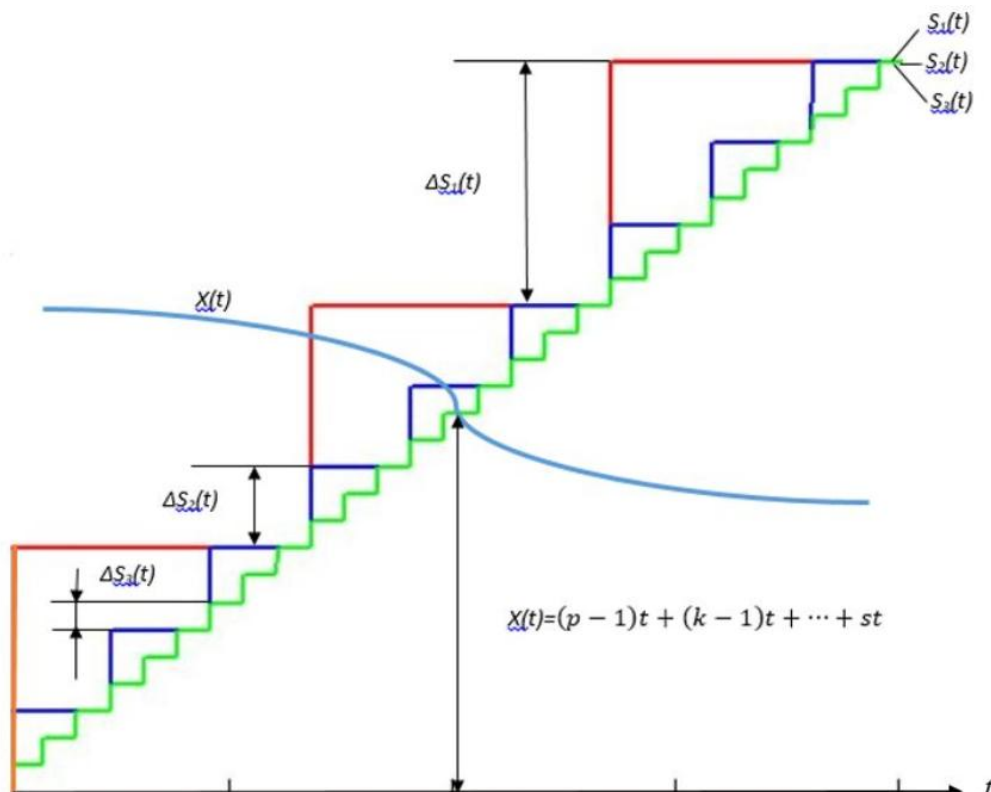


Рис. 4. Розгортальне кодування із застосуванням сімейства ступінчастих розгортальних функцій $h = var$

Необхідно зазначити, що основа системи числення розгортальної функції в сімействі функцій, що описані операційною схемою, еквівалентна кількості каналів вимірювання в структурній схемі пристрою для вимірюван-

ня тимчасових інтервалів. Тому для аналізу способу будемо користуватися терміном «кількість каналів» (рис. 5).

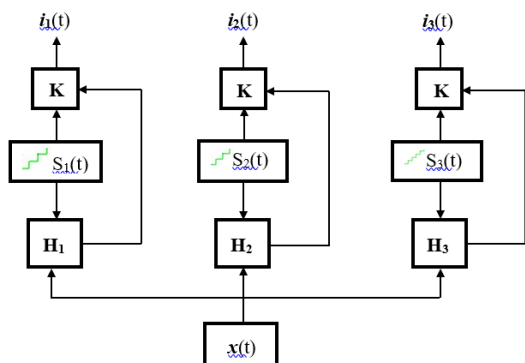


Рис. 5. Структурна схема розгортального перетворення із застосуванням сімейства ступінчастих розгортальних функцій $h = var$.

Розроблений спосіб наведено на рис. 6 [10]. З початкового імпульсу (старт-імпульсу) вимірюваного тимчасового інтервалу (рис. 3, а) формується імпульс, тривалістю $\tau_1 = \tau_{max} \leq \frac{\tau_{xmax}}{2}$, який піддається бага-

торазовій затримці з затримкою $t_{зат} \geq \tau_{max}$ на її лініях. Отже, кількість паралельних каналів визначається з виразу

$$n_1 = \overline{ent} \frac{T_{xmax}}{t_{1зат}},$$

де \overline{ent} – округлене до більшого цілого значення дробу $\frac{T_{xmax}}{t_{1зат}}$; T_{xmax} – максимальне значення вимірюваного тимчасового інтервалу (Δt_i) (рис. 6).

Таким чином, утворюється перша шкала паралельних каналів вимірювання (рис. 6, б). Початок імпульсу першої шкали є початком другої (рис. 6, в). Для цього необхідно імпульси першої шкали продиференціювати, а потім сформувати з них імпульси, тривалістю τ_2 , які також піддаються багаторазовій затримці з затримкою $t_{2зат} \geq \tau_2$, утворюючи другу шкалу паралельних каналів.

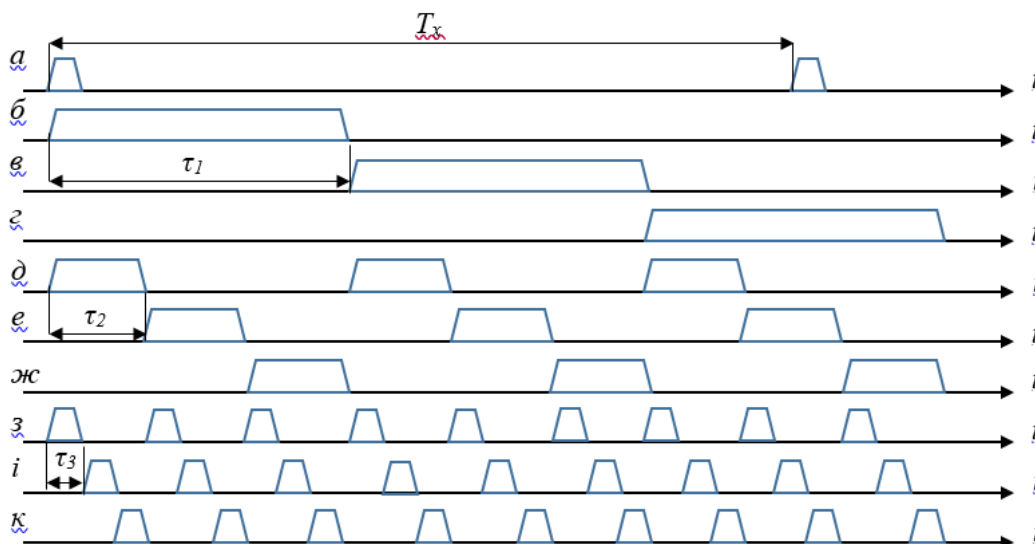


Рис. 6. Тимчасові діаграми багатоскального збігу імпульсів

Кількість паралельних каналів дорівнює

$$n_2 = \overline{ent} \frac{t_{1зат}}{t_{2зат}},$$

оскільки максимальною величиною інтервалу (імпульсу), що надходить від другої лінії затримки, є значення $t_{2зат}$. Таким чином, протягом юватися n_2 , разів. Початок кожного імпульсу другої шкали є початком третьої, у цьому випадку

$$n_3 = \overline{ent} \frac{t_{2зат}}{t_{3зат}}$$

тощо.

У загальному випадку для m шкал

$$n_m = \overline{ent} \frac{t_{m-1зат}}{t_{mзат}}.$$

Тривалість імпульсів останньої шкали дорівнює $\tau_m \geq \tau_{min}$. Якщо тепер подати імпульс, тривалістю τ_{min} , як завершення вимірюваного інтервалу T_{xmax} паралельно на всі шкали, то у всіх відбудуться збіги (рис.3.3), які відображаються в кожній шкалі аналогічно відомому методу затриманих збігів / 9 /.

Таким чином, тривалість вимірюваного тимчасового інтервалу може бути визначена за виразом

$$T_{xmax} = (p - 1)t_{1зат} + (k - 1)t_{2зат} + \dots + st_{mзат},$$

де p, k, s – номери каналів у кожній шкалі, де стався збіг кінцевого імпульсу вимірюваного тимчасового інтервалу з затриманим.

Необхідно зазначити, що для описаного способу похибка вимірювання тривалості тимчасового інтервалу, визначається найменшим ступенем квантування, тобто τ_{min} .

З опису способу багатошкального збігу впливає, що до складу сімейства розгортальних функцій належать розгортальні функції з різною основою системи числення.

Визначимо мінімальну кількість шкал і каналів вимірювання для пристроїв, що використовують спосіб багатошкального збігу:

позначимо загальну кількість каналів як S , тоді

$$S = \frac{T_x}{\tau_1} + \sum_{i=2}^m \frac{\tau_{i-1}}{\tau_i}, \quad (1)$$

У цьому випадку

$$\frac{T_x}{\tau_1} \geq 2, \quad \frac{\tau_{i-1}}{\tau_i} \geq 2, \quad \tau_m = \tau_{min}.$$

Позначимо

$$\frac{T_x}{\tau_1} = n_1, \quad \frac{\tau_1}{\tau_2} = n_2, \dots, \frac{\tau_{i-1}}{\tau_i} \geq n_m.$$

Тоді

$$S = n_1 + n_2 + \dots + n_m = \sum_{i=1}^m n_i. \quad (2)$$

Позначимо

$$n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m = \prod_{j=1}^m n_j = \frac{T_x}{\tau_m} = P. \quad (3)$$

Таким чином, нам необхідно мінімізувати вираз (2) за умови (3). За фіксованого m це досягається, якщо

$$n_i = n_j = \sqrt[m]{P}, \quad \text{де } i, j = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Тоді

$$S = m \cdot \sqrt[m]{P}. \quad (5)$$

Необхідність і достатність цього впливає з відомої нерівності Коші, що зв'язує середнє арифметичне і середнє геометричне:

$$\frac{n_1 + n_2 + \dots + n_m}{m} \geq \sqrt[m]{n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m}. \quad (6)$$

Продиференціювавши (6) за m , отримаємо

$$\frac{dS}{dm} = \sqrt[m]{P} \cdot \left(1 - \frac{\ln P}{m}\right). \quad (7)$$

Звідки

$$m_{екстр} = \ln P. \quad (8)$$

Отже, значення m , яке мінімізує суму (2) за умови (3), визначається значення $\ln P$.

Значення n , яке мінімізує суму (2) за умови (3), знаходиться із (5) і (8).

$$n_{min} = \sqrt[m]{P}. \quad (9)$$

Отже:

$$n_{min} = e. \quad (10)$$

Висновки

Спосіб багатошкального збігу імпульсів та математична модель розрахунку кількості каналів вимірювання були використані для синтезу перетворювачів швидкості та лінійних переміщень, оснований на оптичних (лазерних) розгортальних системах пристроїв перетворення інформації радіолокаційних датчиків швидкості, що зі свого боку основані на ефекті Доплера. У такий спосіб були синтезовані пристрій для звіряння частот, цифровий частотомір, цифровий фазометр й інші пристрої частотно-часової групи.

Література

1. Деформационный мониторинг мостов. Значение и задачи / Матеріали сайту. 2015 Режим доступу: https://www.icentre-gfk.ru/article/a_def_mon_bridges.htm.
2. Темников Ф. Е. Методы и модели развертывающих систем Москва: Энергоатом-издат, 1987. 136 с.
3. Левтеров А. І., Фандеева А. С. Вимірювання тимчасових навантажень від рухомого складу мостів та шляхопроводів. *Вісник ХНАДУ*. 2020. Вип. 89. С. 20–28.
4. Levterov A. I., Storchak M. O. Measuring system to monitor deformation of large size structure members. *Bulletin of Kharkov National automobile and highway university*. Collection of scientific works, issue 83.2018. С. 66–73.
5. Левтеров А. І., Лабенко Д. П. Вимірювальна система для моніторингу деформацій мостових споруд та підмостового габариту. *Вісник ХНАДУ*. Вип. 86.Т. 1. 2019. С. 20–28.
6. Levterov A. I., Zakharchenko M. Measuring System to Monitor Deformation of Large Size

- Structure Members. *Central European Researchers Journal*. 2020. Vol. 6. Issue 1. P. 97–104.
7. Гитис Э. И. Аналого-цифровые преобразователи. Москва: Энергоиздат, 1981. 360 с.
 8. Гельман М. М. Аналого-цифровые преобразователи для информационно-измерительных систем. Москва: Изд-во стандартов, 2009. 317 с.
 9. Цифровые электроизмерительные приборы / Шляндин В. М. и др. Москва: Энергия, 1972. 400 с.
 10. А. с. 926613 СССР, МКИ³ G 04 F 10/04. Способ измерения временных интервалов / В. В. Дюняшев, А. И. Левтеров. №2912582/18-21; заявл. 24.04.80; опубл. 07.05.82. Бюл. №17.

References

1. Deformatsionnyi monitoring mostov. Znachenie i zadachi [Bridge deformation monitoring. Meaning and tasks]. / Materialy сайту [Material from site.]. 2015. Rezhim dostupu [Access:]: https://www.icentre-gfk.ru/article/a_def_mon_bridges.htm [in Russia].
2. Temnikov F. E. Metody i modeli razvertyvaushchih system [Methods and models of scanning systems]. Moscow : Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1987. 136 s. [in Russia].
3. Levterov A. I., Fandieieva A.Y. Vimiruvannya timchasovih navantagen vid ruhomogo skladu mostiv ta chlyahoprovodiv. Vestnic HNADU. 2020. Vip. 89. 2020. S. 67–75.
4. Levterov A. I., Storchak M. O. Measuring system to monitor deformation of large size structure members. *Bulletin of Kharkov National automobile and highway university*. Collection of scientific works, issue 83. 2018. C. 66–73.
5. Levterov A. I., Labenko D. P. Vimiruvalna sistema dlya monitoringu deformaci mostovih sporud ta chlyahoprovodiv. Vestnic HNADU. 2020. Vip. 86 T1. 2019. S. 20–28.
6. Levterov A. I., Zakharchenko M. Measuring System to Monitor Deformation of Large Size Structure Members. *Central European Researchers Journal*. 2020. Vol. 6. Issue 1. P. 97–104.
7. Gitis Eh. I. & Piskulov E. A. Analogovo-tsifrovye preobrazovateli [Analog-digital converters]. Moscow : Energoizdat [Energoizdat], 1981. 360 s. [in Russia].
8. Gelman M. M. Analogovo-tsifrovye preobrazovateli dlia informatsionno-izmeritelnyh system [Analog-digital converters for information-measuring systems]. Analog-digital converters for information-measuring systems. Moscow : Iz-vo standartov [Publishing house of standards], 2009. 317 s. [in Russia].
9. Tsifrovie elektroizmeritelnie pribori / Chlyandina V. M. i dr. Moskva: Energiya, 1972. 400 s. [in Russia].

10. А.с. 926613 SSSR, МКИ³ G 04 F 10/04. Sposob izmereniya vremennih intervalov / V. V. Dunyahev, A. I. Levterov. №2912582/18-21; yayavl. 24.04.80; opubl. 07.05.82, Bul.№17 [in Russia].

Левтеров А.И., к.т.н., професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків, тел. (057)707-36-58, lai@khadi.kharkov.ua.

Method of multiscale coincidence of pulses for measuring temporary loads from moving vehicles in bridges and overpasses

Abstract. Modern development of road transport is characterized by constant updating of the nomenclature of cars (including heavy-duty vehicles), by increasing of intensity and speed of their movement, especially in large metropolises and on roads of national and local significance. This complicates the operating conditions of spans of highway bridges to some extent, leads to their damage and early wear. The deterioration of the technical condition of the structures of the spans is largely due to the increased dynamic impact of the cars on the bridges. The purpose of this article is to measure the amplitude of oscillations of a bridge structure from temporary loads of rolling stock with non-periodic long-term loading by optical methods. In accordance with this goal, it is necessary to develop a technique and device for measuring the amplitude of oscillations of the bridge structure by converting the amplitude of oscillations in time intervals and their subsequent measurement by multiscale pulse coincidence. In a number of works, digital deployment systems that use number systems with different bases, represented by a family of deployment functions, are considered in detail. Such digital systems in general, are described by the corresponding operating scheme. According to this operating scheme, a method of multiscale matching for measuring time intervals was developed, which formed the basis for measuring the vibration amplitude of the bridge structure. The given mathematical model of calculation of the number of measurement channels was used in the synthesis of velocity transducers and linear displacements based on optical (laser) deployment systems, information conversion devices of radar velocity sensors based on the Doppler effect. Similarly, a frequency comparison device, a digital frequency meter, a digital phase meter, and a number of other frequency-time group devices were synthesized.

Key words: rolling stock, bridge, overpass, unfolding optical system, laser, collimator, photodetector, sectional delay line, multi-scale pulse coincidence.

Levterov A. I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudroho, Kharkiv, 61002, Ukraine, +380577073658, e-mail: lai@khadi.kharkov.ua.