

ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ

УДК 621.891:620.11

**С.Ф. Філоненко, д.т.н., проф.
Т.М. Косицька, к.х.н.****ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ КОЛИВАНЬ
НА АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛІВ ЗМІЩЕННЯ**

Розглянуто результати експериментальних досліджень впливу інтервалу дискретизації сигналів прискорення та швидкості коливань на амплітудно-частотні залежності сигналів зміщення після виконання операцій подвійного або одинарного перетворення. Показано основні закономірності зміни вихідних амплітуд сигналів зміщення від частоти вхідних сигналів за заданими значеннями інтервалу дискретизації. Визначено, що інтервал дискретизації не впливає на амплітудно-частотні залежності сигналів зміщення за умови, що перетворення виконується зі сталою часу, яка дорівнює половині періоду вхідних сигналів швидкості та прискорення коливань.

The results of experimental researches of influencing a sampling interval of acceleration and speed oscillation signals on amplitude-frequency relations of displacement signals after using the operations of double or unary transformation are reviewed. Are shown the main regularity a change of displacement signals output amplitudes from frequency of input signals at set values of a sampling interval. Is determined, that the sampling interval does not influence on amplitude-frequency displacement signals relations under condition, that the transformation is executed from time constants, which value is peer to half part of period a input oscillation signals of speed and acceleration.

амплітуда зміщень, інтервал дискретизації, прискорення коливань, сигнал зміщення, частота коливань, швидкість коливань**Постановка проблеми**

Достовірність визначення динамічних зміщень з використанням датчиків прискорення та швидкості коливань є важливим питанням у діагностиці мостових конструкцій. Це обумовлено тим, що оцінка просторової роботи конструкції здійснюється з використанням динамічного коефіцієнта [1–6], який визначається відношенням статичного та динамічного переміщень конструкцій у прийнятих умовах навантаження. Якщо статичні переміщення визначаються з високою точністю вимірювань із використанням стандартних методів тензометрії, то застосування цих методів для вимірювання динамічних переміщень не є коректним. У той же час, при використанні високочутливих методів реєстрації сигналів швидкості та прискорення коливань з наступним їх перетворенням у сигнал зміщення потребує виконання операцій інтегрування. Вони повинні виконуватися з заданою величиною сталої часу інтегрування. Її вибір впливає на достовірність визначення динамічних зміщень конструкцій.

Питання впливу сталої часу інтегрування на достовірність визначення динамічних зміщень конструкцій після перетворення сигналів швидкості та прискорення коливань розглянуто в роботах [7; 8], де показано, що залежності зміни вихідної амплітуди сигналів зміщення від сталої часу інтегрування мають нелінійний, дзвоноподібний характер.

Однак максимальне значення амплітуди сигналу зміщення відповідає значенню сталої часу інтегрування, що дорівнює половині періоду вхідного сигналу. Це належить як до обробки модельних сигналів синусоїдальної форми, так і до обробки реальних загасаючих сигналів із різними частотами коливань. Результати досліджень у лабораторних умовах та під час випробувань мостових конструкцій мають добре узгодження між собою [9].

Вплив параметрів цифрового перетворення аналогових сигналів швидкості та прискорення коливань на амплітуду вихідних сигналів зміщення розглянуто в роботі [10], де показано, що інтервал дискретизації сигналів швидкості та прискорення коливань не впливає на амплітуду сигналу зміщення у випадку, якщо одинарне або подвійне інтегрування виконується зі сталою часу, яка дорівнює половині періоду вхідних сигналів. Це стосується модельних сигналів синусоїдальної форми та реальних загасаючих сигналів, реєстрованих із використанням датчиків швидкості та прискорення коливань. Дослідження проводили за умови сталості частоти вхідних сигналів. Однак під час проектування та будівництва мостів застосовують різні конструктивні рішення (тип, розміри), що обумовлює існування різних основних мод або частот коливань. Із точки зору достовірності визначення динамічних зміщень конструкцій важливим є визначення впливу інтервалу дискретизації вхідних сигналів швидкості та прискорення коливань з різними частотами на параметри вихідних сигналів зміщення.

Мета роботи – показати, що за заданою амплітудою вхідного сигналу швидкості коливань та інтервалу його дискретизації зміна амплітуди сигналу зміщення від частоти має обернено пропорційну залежність від частоти. Для сигналу прискорення за заданою амплітудою та інтервалом дискретизації зміна амплітуди сигналу зміщення від частоти має обернено пропорційну залежність від квадрата частоти. Ці закономірності існують за умови, що стала часу інтегрування (одинарного або подвійного) дорівнює половині періоду вхідного сигналу. Зі зміною значення інтервалу дискретизації отримані закономірності для сигналу швидкості та прискорення не змінюються, що показує високу достовірність перетворення вхідних сигналів коливань в сигнал зміщення, згідно з розробленою методологією визначення динамічних зміщень конструкцій.

Методика досліджень

Для дослідження впливу інтервалу дискретизації на амплітуду сигналу зміщення, після перетворення сигналів прискорення та швидкості коливань зі змінною частотою, використовували методику та установку, які розглянуто в роботі [10]. Структурну схему установки показано на рис. 1.

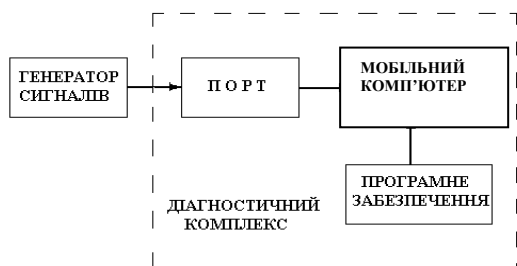


Рис. 1. Структура установки для реєстрації й обробки сигналів швидкості та прискорення коливань

Методика досліджень полягала в такому. Проводили реєстрацію та обробку стандартного сигналу синусоїдальної форми, який розглядався як імітаційний сигнал швидкості або прискорення коливань. Сигнал формувался на виході генератора і подавався на вхід діагностичного комплексу "FREQS" (рис. 1). Процесом вимірювань, обробкою та аналізом даних керували з використанням програмного забезпечення.

Перетворення вхідного аналогового сигналу в цифрові коди виконується з інтервалом дискретизації Δt , величина якого змінювалася у діапазоні значень

$$\Delta t = 68,73 \text{ мкс} - 1695,0 \text{ мкс}.$$

Після перетворення сигналів проводили їх запис у мобільний комп'ютер і формували логічні масиви даних.

Аналогові синусоїдальні сигнали швидкості та прискорення коливань мали постійні значення максимальної амплітуди, відповідно, U_1' і U_1'' . Для проведення досліджень здійснювалася зміна частоти вхідних сигналів у діапазоні значень від 5 до 30 Гц. Обробку зареєстрованих сигналів швидкості та прискорення проводили з їх перетворенням у сигнал зміщення. Для цього використовували операцію інтегрування. Для сигналу швидкості виконувалось одинарне, а для сигналу прискорення подвійне інтегрування. Операції виконувались зі сталою часу інтегрування, яка дорівнювала половині періоду вхідних сигналів. За результатами перетворення сигналів швидкості та прискорення коливань для кожного значення інтервалу дискретизації Δt здійснювалася побудова і аналіз залежності зміни амплітуди сигналу зміщення від частоти.

При цьому похибка вимірювання частоти діагностичним комплексом за результатами обробки спектрів реєстрованих сигналів не перевищує $\pm (0,3 + 0,05 f_{\max})$ Гц, а похибка вимірювання амплітуди сигналів зміщення – значення $\pm (0,3 + 0,05 U_{\max})$ В. Аналіз отриманих залежностей зміни амплітуди сигналу зміщення від частоти для кожного інтервалу дискретизації вхідних сигналів проводився з використанням методів аналізу графічних даних. У зв'язку з цим визначався вид функції апроксимації, значення коефіцієнтів пропорційності, а також дисперсія для заданої імовірності.

Результати досліджень

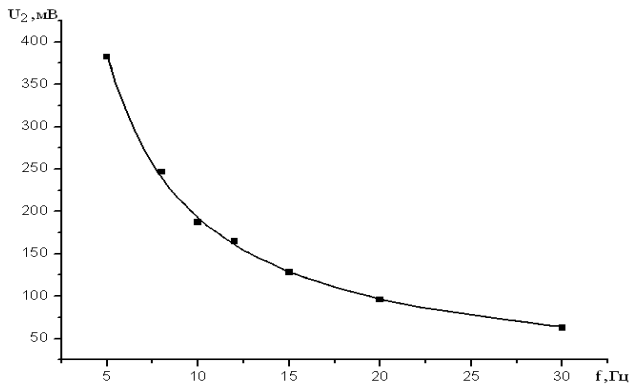
Операції одинарного перетворення сигналу швидкості коливань у сигнал зміщення та подвійного перетворення сигналу прискорення в сигнал зміщення є операціями інтегрування зі сталою часу δ , яка повинна дорівнювати половині періоду вхідних сигналів. Її вибір обґрунтовано в роботах [7; 8].

Згідно з класичним визначенням подібних операцій інтегрування синусоїдальних функцій зі зміною частоти вхідного сигналу швидкості вихідна амплітуда сигналу зміщення (одинарна операція інтегрування) повинна мати значення, обернено пропорційні частоті, тобто $U_2 \sim f^{-1}$ [11].

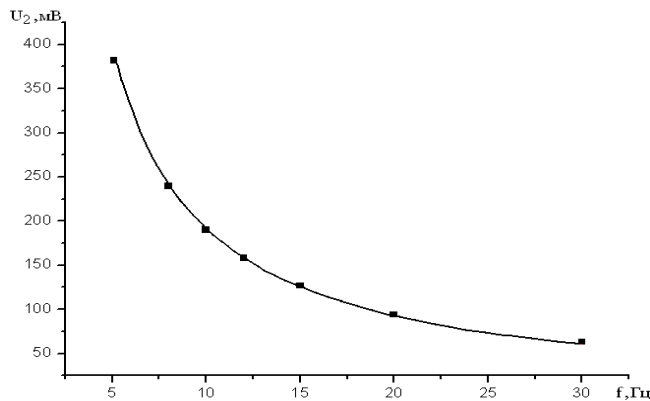
У випадку подвійного інтегрування сигналу прискорення вихідна амплітуда сигналу зміщення повинна мати значення, обернено пропорційні квадрату частоти, тобто $U_2 \sim f^{-2}$.

Існування таких залежностей, безумовно, повинно свідчити про правильність вибору сталої часу інтегрування та достовірність методу визначення динамічних зміщень конструкцій [7; 8; 12].

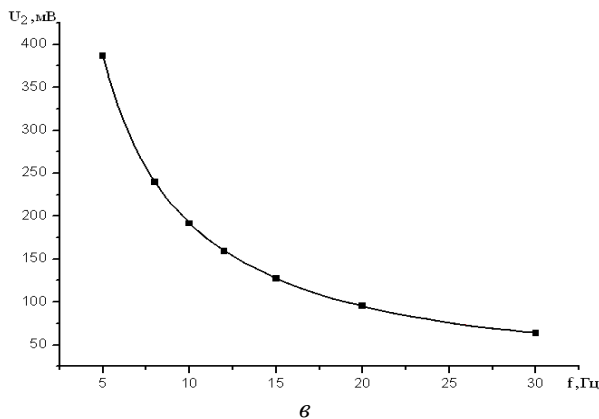
На першому етапі досліджень впливу інтервалу дискретизації на амплітуду сигналу зміщення після перетворення вхідного сигналу зі змінною частотою як модельний сигнал швидкості використовували сигнал синусоїдальної форми. Сигнал мав постійне значення амплітуди $U_1' = 5,25$ В і подавався на вхід діагностичного комплексу (рис. 2, а), де здійснювалася його обробка.



а



б



в

Рис. 2. Зміна амплітуди сигналів зміщення від частоти за перетворення сигналу швидкості для різних значень інтервалу дискретизації Δt :

а – 68,73 мкс;

б – 240,4 мкс;

в – 1136,0 мкс

Аналіз отриманих результатів показав, що для всіх значень частот вхідного сигналу швидкості зміна інтервалу його дискретизації Δt у діапазоні $\Delta t = 68,73 - 1695,0$ мкс не впливає на спектри вихідних сигналів зміщення, тобто резонансні частоти, які визначено за спектрами сигналів швидкості та зміщення, збігаються між собою.

У той же час, за постійної амплітуди сигналу швидкості та заданої величини інтервалу дискретизації ($\Delta t = \text{const}$) зростання частоти вхідного сигналу призводить до зменшення амплітуди вихідного сигналу зміщення. Така закономірність спостерігається для всіх досліджуваних величин інтервалу дискретизації в розглянутому діапазоні значень.

На рис. 2 показано залежності зміни амплітуди сигналів зміщення від частоти вхідного сигналу швидкості для значень інтервалу дискретизації, 68,73 мкс (а), 240,4 мкс (б), 1695,0 мкс (в). Час перетворення становив $\delta = T_1/2$ (T_1 – період вхідного сигналу швидкості).

Аналіз отриманих результатів із використанням математичного пакета прикладних програм “Origin” показав, що залежності зміни амплітуди сигналів зміщення від частоти після перетворення сигналів швидкості коливань, які мали постійну величину вхідної амплітуди, для всіх значень інтервалу дискретизації описуються функцією

$$U_2 = af^{-b}, \quad (1)$$

де

a, b – коефіцієнти.

Апроксимація отриманих даних показала, що коефіцієнти апроксимуючого виразу після перетворення сигналів швидкості коливань мають такі значення:

– для інтервалу дискретизації $\Delta t = 68,73$ мкс (рис. 2, а)

$a = 1945,22, b = 0,994$;

– для інтервалу дискретизації $\Delta t = 240,4$ мкс (рис. 2, б)

$a = 1939,22, b = 1,047$;

– для інтервалу дискретизації $\Delta t = 1136,0$ мкс (рис. 2, в)

$a = 1961,55, b = 1,01$.

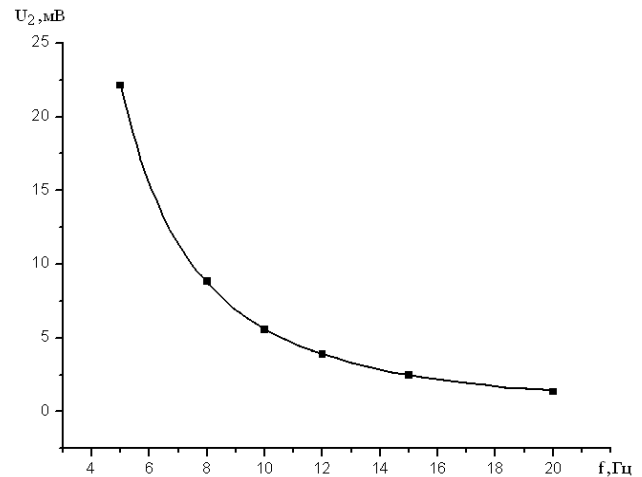
У зв'язку з цим дисперсія σ^2 апроксимації експериментальних даних для визначених ймовірностей p становила:

- для інтервалу дискретизації $\Delta t = 68,73$ мкс $\sigma^2 = 0,5899$ з імовірністю $p = 0,99874$;
- для інтервалу дискретизації $\Delta t = 240,4$ мкс $\sigma^2 = 0,6093$ з імовірністю $p = 0,99563$;
- для інтервалу дискретизації $\Delta t = 1136,0$ мкс $\sigma^2 = 0,2178$ з імовірністю $p = 0,99998$.

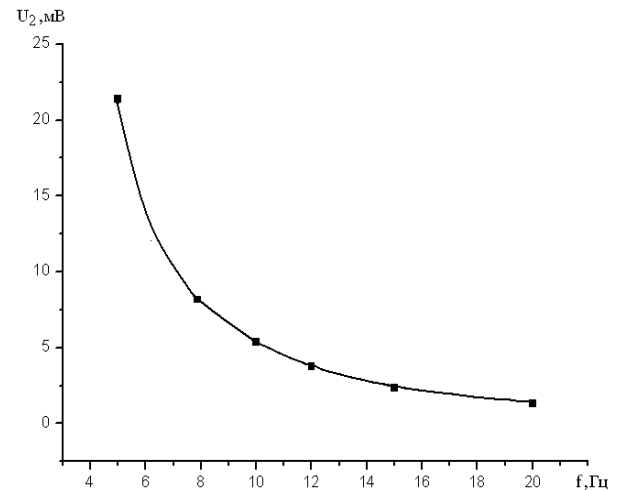
Із отриманих результатів видно, що для всіх значень інтервалу дискретизації залежності зміни амплітуди сигналів зміщення від частоти вхідного сигналу швидкості з мінімальною дисперсією описуються степеневою функцією з показником ступеня, значення якого практично дорівнює мінус одиниці. Іншими словами значення амплітуди сигналів зміщення обернено пропорційно частоті вхідного сигналу швидкості коливань, тобто $U_2 \sim f^{-1}$. У зв'язку з цим інтервал дискретизації не впливає на зміну залежностей амплітуд вихідного сигналу зміщення.

Отримані залежності спостерігаються за значення сталої часу інтегрування δ , яка дорівнює половині періоду вхідного сигналу швидкості. За відхилення значення δ від величини $\delta = T_1/2$, тобто $\delta \neq T_1/2$, залежності зміни амплітуди сигналів зміщення від частоти не описуються виразом (1). Це обумовлено тим, що за відхилення часу інтегрування від значення $\delta = T_1/2$ спад амплітуди вихідного сигналу зміщення від δ носить складний нелінійний характер зміни.

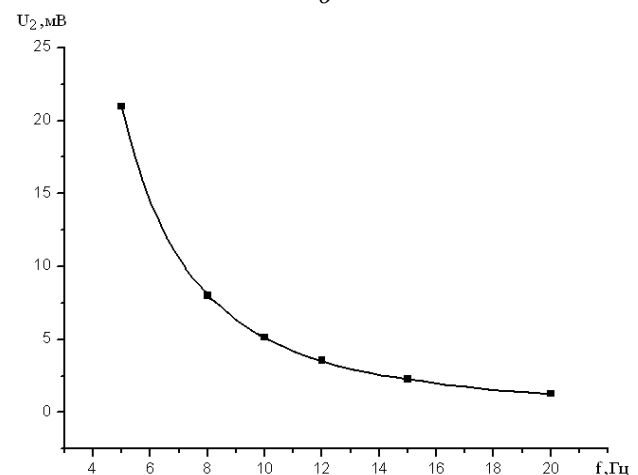
Аналогічні дослідження було проведено для модельного сигналу прискорення коливань, який мав постійне значення амплітуди $U_1'' = 5,25$ В. Сигнал прискорення, як і в першому випадку, подався на вхід діагностичного комплексу (рис. 3, а), де здійснювалася його обробка та аналіз, згідно з розробленою методикою. Обробка отриманих результатів показала, що для всіх значень частот вхідного сигналу прискорення зміни величини інтервалу дискретизації Δt в діапазоні $\Delta t = 68,73$ мкс – 1695,0 мкс не впливає на спектри вихідних сигналів зміщення, тобто резонансні частоти, які визначено за спектрами сигналів прискорення і зміщення, співпадають між собою. У той же час, за постійною амплітудою сигналу прискорення і заданою величиною інтервалу дискретизації ($\Delta t = \text{const}$) зростання частоти вхідного сигналу приводить до зменшення амплітуди вихідного сигналу зміщення. Така закономірність спостерігається для всіх досліджуваних величин інтервалу дискретизації у розглянутому діапазоні значень.



а



б



в

Рис. 3. Зміни амплітуди сигналів зміщення від частоти за подвійного перетворення сигналу прискорення для різних значень інтервалу дискретизації Δt :

а – 68,73 мкс;

б – 240,4 мкс;

в – 1136,0 мкс

На рис. 3 показано залежності зміни амплітуди сигналів зміщення від частоти вхідного сигналу прискорення після його подвійного перетворення для інтервалу дискретизації 68,73 мкс (а), 240,4 мкс (б), 1695,0 мкс (в). Час перетворення становить $\delta = T_1/2$, (T_1 – період вхідного сигналу прискорення).

Аналіз отриманих результатів з використанням математичного пакета прикладних програм “Origin” показав, що залежності зміни амплітуди сигналів зміщення від частоти, після подвійного перетворення сигналів прискорення коливань, які мали постійну величину вхідної амплітуди, для всіх значень інтервалу дискретизації описуються функцією (1). Апроксимація отриманих даних дозволила визначити коефіцієнти апроксимуючого виразу:

- для інтервалу дискретизації $\Delta t = 68,73$ мкс (рис. 3, а) $a = 537,36$, $b = 1,982$;
- для інтервалу дискретизації $\Delta t = 240,4$ мкс (рис. 3, б) $a = 544,47$, $b = 1,989$;
- для інтервалу дискретизації $\Delta t = 1136,0$ мкс (рис. 3, в) $a = 552,06$, $b = 2,03$.

Дисперсії σ^2 апроксимації експериментальних даних для визначених ймовірностей p становили:

- для інтервалу дискретизації $\Delta t = 68,73$ мкс $\sigma^2 = 0,00497$ з ймовірністю $p = 0,99975$;
- для інтервалу дискретизації $\Delta t = 240,4$ мкс $\sigma^2 = 0,001676$ з ймовірністю $p = 0,99993$;
- для інтервалу дискретизації $\Delta t = 1136,0$ мкс $\sigma^2 = 0,00128$ з ймовірністю $p = 0,99998$.

З отриманих результатів видно, що для всіх значень інтервалу дискретизації залежності зміни амплітуди сигналу зміщення від частоти сигналу прискорення після його подвійного перетворення із мінімальною дисперсією описуються степеневою функцією з показником ступеня, значення якого практично дорівнює мінус двом.

Значення амплітуди сигналів зміщення обернено пропорційне частоті вхідного сигналу прискорення коливань, тобто $U_2 \sim f^{-2}$. При цьому інтервал дискретизації не впливає на зміну залежностей амплітуд вихідного сигналу зміщення.

Отримані залежності спостерігаються за значення сталої часу інтегрування δ , яка дорівнює половині періоду вхідного сигналу прискорення.

За відхилення значення δ від $\delta = T_1/2$, тобто $\delta \neq T_1/2$, залежності зміни амплітуди сигналів зміщення від частоти не описуються виразом (1). Це обумовлено тим, що за відхилення часу інтегрування від значення $\delta = T_1/2$ падіння амплітуди вихідного сигналу зміщення від δ , як і в попередньому випадку, носить складний нелінійний характер зміни.

Висновки

Результати проведених досліджень показали, що у зв'язку з проведенням одинарного перетворення сигналів швидкості в сигнал зміщення залежність зміни амплітуди сигналу зміщення від частоти для всіх значень інтервалу дискретизації з мінімальною дисперсією і високою імовірністю описується степеневою функцією. При цьому значення показника ступеня дорівнює мінус одиниці, тобто амплітуда сигналу зміщення після перетворення сигналу швидкості обернено пропорційна частоті вхідного сигналу ($U_2 \sim f^{-1}$).

За проведення подвійного перетворення сигналу прискорення в сигнал зміщення залежність зміни амплітуди сигналу зміщення від частоти для всіх значень інтервалу дискретизації вхідного сигналу з мінімальною дисперсією і високою імовірністю також описується степеневою функцією. Значення показника ступеня в цьому випадку дорівнює мінус двом, тобто амплітуда сигналу зміщення після подвійного перетворення сигналу прискорення обернено пропорційна квадрату частоти вхідного сигналу ($U_2 \sim f^{-2}$). У зв'язку з цим визначено, що інтервал дискретизації вхідного сигналу швидкості або прискорення коливань не впливає на зміну залежностей амплітуди сигналів зміщення від частоти. Отримані залежності існують за умови, що стала часу інтегрування дорівнює половині періоду вхідного сигналу прискорення або швидкості. За відхилення значення сталої часу інтегрування від даної величини залежності зміни амплітуди сигналів зміщення від частоти не підкоряються встановленим закономірностям. Отримані результати показують високу достовірність розробленого методу визначення динамічних характеристик конструкцій у зв'язку з обробкою сигналів прискорення та швидкості коливань.

Література

1. *Мости: конструкції та надійність* / Й.Й. Лучко, П.М. Коваль, М.М. Корнієв та ін. – Л.: Каменяр, 2005. – 989 с.
2. *Lucas J.* Structural load testing and flexure analysis of the route 701 bridge in louisa county, Virginia: Final report VTRC 04-R12 / J. Lucas, T.E. Cousins, M.C. Brown at al. – Virginia Transportation research council. – June 2004. – 31 p.
3. *Ritter M.A.* Dynamic response of stress-laminated-deck bridges /M.A. Ritter, D.L. Wood, T.J. Wipf at al // The 4th Intern. Bridge Engin.Conf., August 28–30, Washington, 1995: Proc. – Vol 2. – 1995. – P. 381 – 394.
4. *Taylor S.E.* Development and testing of portable glulam timber bridge systems / S.E. Taylor, M.A. Ritter // 79th Annual meeting of transportation research board, January 9–13, 2000, Washington. – 2000. – Paper No.00-0334. – 16 p.
5. *Chaallal O.* Experimental evaluation of dynamic amplification for evaluation of bridge performance: Technical report No.ETS.DRSR.98.1 / O.Chaallal, M. Shahawy. – University of Quebec, Canada. June 1998. – 67 p.
6. *Філоненко С.Ф.* Методи та засоби діагностики мостових конструкцій / С.Ф. Філоненко, І.К. Корнієнко, Т.М. Косицька // Вісник НАУ. – 2008. – № 3. – С. 172–182.
7. *Babak V.P.* Optimization of signal features under objects' dynamic test / V.P. Babak, S.F. Filonenko, I.K. Kornienko-Miftakhova, A.V. Ponomarenko // Aviation. – 2008.– Vol 12, N1. – P.10– 17.
8. *Бабак В.П.* Обработка сигналов при динамических испытаниях объектов / В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко, И.К. Корниенко-Мифтахова, А.В. Пономаренко // Технологические системы. – 2007. – № 1(37). – С.25–32.
9. *Філоненко С.Ф.* Аналіз динамічних характеристик моста /С.Ф. Філоненко, П.М. Коваль, П.М. Шашук, І.К. Корнієнко // Дороги і мости: зб. наук. пр. Держдор НДІ ім. М.П. Шульгіна. – 2008. – Вип.9. – С. 119–128.
10. *Філоненко С.Ф.* Вплив параметрів цифрового перетворення сигналів коливань на достовірність визначення динамічних зміщень конструкцій /С.Ф. Філоненко, Т.М. Косицька, І.К. Корнієнко // Вісник НАУ. – 2009. – № 2. – С. 113–132.
11. *Лузин Н.Н.* Интегральное исчисление / Н.Н. Лузин. – М.: Сов. наука, 1958. – 415 с.
12. *Пат. №84911*, Україна, МПК G01N 29/12 G01M 7/02. Спосіб визначення динамічних зсувів конструкцій / С.Ф. Філоненко, В.П. Бабак, І.К. Корниенко-Мифтахова. – № а 200610738; заявл. 10.10.2006; Опубл. 10.12.2008, Бюл. № 23.

Стаття надійшла до редакції 07.09.09.