

УДК 621.891:620.11

Филоненко С.Ф., Косицкая Т.Н., Корниенко И.К.
 Национальный авиационный университет. Украина, Киев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ СКОРОСТИ

Анотація

Розглянуто вплив нелінійності коефіцієнта перетворення індукційних датчиків швидкості на числові значення параметрів реєстрованих сигналів коливань. Показано, що теоретична та експериментальна залежності початкової ділянки амплітудно-частотної характеристики датчиків мають добре узгодження між собою і описуються степеневою функцією. Розроблено метод розширення частотного діапазону індукційних датчиків на основі корегування їх коефіцієнту перетворення. Показано, що врахування нелінійності коефіцієнту перетворення дозволяє мінімізувати похибку визначення динамічних зсувів на частотах нижче резонансної частоти датчиків.

Abstract

Influencing non-linearity of inductive velocity sensors conversion coefficient on numeric values of registered signals oscillations parameters is reviewed. Is shown, that idealized and experimental relation of the initial segment sensors amplitude-frequency characteristics have the good coordination among themselves and are described by an exponential function. The method dilating the inductive sensors frequency band is designed on the basis of updating their conversion coefficient. Is shown, that the count of non-linearity conversion coefficient allows to minimizing an error of definition the dynamic displacement on frequencies below than sensors resonance frequency.

Введение

При проведении оценок пространственной работы мостовых конструкций одной из наиболее важных характеристик является коэффициент динамической пригодности, который рассчитывается в виде отношения динамического и статического перемещений конструкции [1–4]. Динамические перемещения определяются по результатам регистрации и обработки колебаний, возбуждаемых в конструкции при ее испытании. При этом в качестве первичных преобразователей используются датчики индукционного и пьезокерамического типов [5–7], которые обладают высокой чувствительностью.

Работа датчиков индукционного типа и их характеристики рассмотрены в [8–10]. Проведенные исследования с определением закономерностей изменения спектральных характеристик выходных сигналов индукционных датчиков скорости колебаний показало следующее. В случае большого собственного затухания датчика преобразование скорости колебаний в электрический сигнал на высоких частотах, начиная с резонансной частоты, происходит практически с постоянным коэффициентом преобразования. Однако на частотах ниже резонансной частоты датчика в спектрах его выходного сигнала наблюдается уменьшение амплитуд. Это обусловлено тем, в выражение, которое описывает спектры выходного сигнала датчика, входит коэффициент пропорциональности $P(\omega)$ [9], зависящий от частоты

$$P(\omega) = \frac{\lambda \omega^2}{\sqrt{(\Omega^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент, определяемый конструктивными особенностями индукционного датчика; Ω — собственная частота колебаний измерительной системы в датчике; α — коэффициента затухания измерительной системы; ω — частота регистрируемых колебаний исследуемой поверхности.

Фактически на частотах ниже резонансной частоты индукционного датчика скорости колебаний наблюдается падение числового значения коэффициента преобразования.

Проведенные исследования показывают, что применение датчиков индукционного типа для исследования и определения параметров колебаний конструкций имеет ограничения. Данные ограничения связаны с частотным диапазоном работы датчиков, нижняя граница которого определяется значением его резонансной частоты. Так, например, для индукционных датчиков типа СВ-10Ц значение резонансной частоты составляет 10 Гц, а для датчика типа СВ-5 — 5 Гц. В тоже время, как показывают исследования [11], для крупногабаритных мостовых конструкций частоты возникающих колебаний, как правило, находятся в области частот, расположенной ниже резонансной частоты датчика. С учетом преимуществ

индукционных датчиков скорости колебаний типа СВ, СГ (чувствительность, помехозащищенность, габариты и масса, удобство установки на конструкции и т.д.) их использование в области частот ниже резонансной частоты возможно при условии учета нелинейности коэффициента преобразования.

В статье будут рассмотрен метод учета нелинейности коэффициента преобразования индукционных датчиков скорости колебаний при определении динамических характеристик конструкций. Будут приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований начального участка амплитудно-частотной характеристики индукционных датчиков скорости колебаний. Будет показано, что теоретическая и экспериментальная зависимости изменения коэффициента преобразования от частоты описываются однотипными функциями. При этом коэффициент преобразования на заданной частоте с минимальной ошибкой можно определять с учетом значения коэффициента преобразования датчика на резонансной частоте и значения самой резонансной частоты.

Результаты исследований

При проведении динамических испытаний мостовых конструкций, как показали исследования [11], индукционные датчики скорости колебаний типа СВ-10Ц, обладающие достаточно высокой чувствительностью ($K_p > 15$ В/м/с), позволяют получать и обрабатывать сигналы, в спектрах которых хорошо различимы близко лежащие частотами. Для датчиков данного типа собственная частота колебаний составляет 10 Гц (речь идет о собственной частоте колебаний измерительного устройства датчика). Исходя из этого, проведем моделирование коэффициента преобразования, согласно (1), для собственной частоты измерительного устройства, значение которой равно 10 Гц.

Результаты моделирования $P(\omega)$ в виде зависимостей изменения $P(f)/\lambda$, где $f = \omega/2\pi$, от частоты, для разных значений собственного коэффициента затухания α измерительного устройства показаны на рис. 1. При построении графиков рис. 1 были приняты следующие значения коэффициента затухания α измерительного устройства: $\alpha = 10$ с⁻¹, $\alpha = 15$ с⁻¹, $\alpha = 20$ с⁻¹, $\alpha = 25$ с⁻¹. Значение собственной частоты колебаний измерительного устройства составляет 10 Гц.

Из полученных результатов видно, что при малых значениях затухания α в области частот близких к частоте собственных колебаний измерительного устройства наблюдается максимум (1, рис. 1). Его величина уменьшается с увеличением α (2, 3, 4 рис. 1). Из рис. 1 так же видно, что при больших значениях затухания α (4, рис. 1)

даже в области частот, близких к частоте собственных колебаний измерительного устройства, график зависимости $P(\omega)$ изменяется достаточно плавно. При этом на собственной резонансной частоте измерительного устройства максимум не имеет явно выраженного характера. В то же время, на частотах, значения которых меньше резонансной частоты, наблюдается резкое падение коэффициента преобразования (рис. 1).

Одним из основных требований, предъявляемых к индукционным датчикам скорости колебаний типа СВ и СГ, согласно стандарта [12], является требование к равномерности их амплитудно-частотной характеристики (равномерности значения коэффициента преобразования) на частотах выше резонансной частоты датчика. При этом величина отклонения коэффициента преобразования в области частот выше резонансной частоты не должна превышать 5% от его значения на резонансе. Данное требование обеспечивается введением соответствующего значения собственного коэффициента затухания α измерительного устройства индукционного датчика скорости колебаний. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 1, показывает, что не превышение 5% отклонения коэффициента преобразования для собственной частоты измерительного устройства 10 Гц достигается при значении α равным $\alpha = 25$ с⁻¹ (кривая 4, рис. 1). В тоже время, обработка зависимостей, аналогичных зависимостям, приведенным на рис. 1, для собственной частоты измерительного устройства 5 Гц показала, что не превышение 5% отклонения коэффициента преобразования, в данном случае, достигается при значении α равным $\alpha = 15$ с⁻¹. Из полученных результатов видно, что увеличение собственной частоты измерительного устройства для обеспечения не более

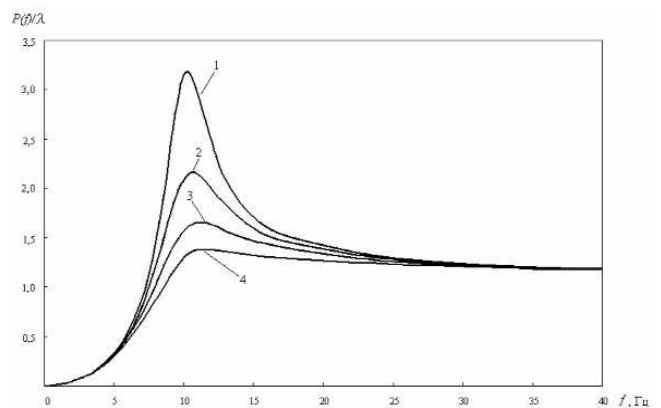


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента пропорциональности измерительной системы $P(f)/\lambda$ от частоты при разных значениях затухания α :
 1 – $\alpha = 10$ с⁻¹; 2 – $\alpha = 15$ с⁻¹; 3 – $\alpha = 20$ с⁻¹;
 4 – $\alpha = 25$ с⁻¹. Собственная частота измерительного устройства 10 Гц

5% отклонения коэффициента преобразования в области частот выше резонансной частоты от его максимального значения на резонансе требует более высокого значения затухания α .

Как было отмечено ранее, результаты испытаний мостовых конструкций показывают, что при динамическом их нагружении регистрируемые колебания имеют частоты, расположенные в области ниже резонансной частоты датчика. Поэтому проведем анализ начального участка зависимости изменения коэффициента преобразования датчика от частоты (зависимость 4, рис. 1) до резонансной частоты, значение которой составляет 10 Гц. Для возможности сравнения теоретических результатов с экспериментальными данными анализ зависимости будем проводить в относительных единицах. Начальный участок зависимости 4 (рис. 1) в относительных (нормированных) единицах коэффициента преобразования показан на рис. 2, кривая 1. Обработка зависимости с использованием математического пакета "ORIGIN", предназначенного для обработки данных показала, что начальный участок теоретической зависимости (1, рис. 2) хорошо описывается степенной функцией вида

$$y(K_p/K_{pmax}) = af^b, 0 < f < f_{max} \quad (2)$$

где f – частота; a, b – коэффициенты аппроксимирующего выражения; f_{max} – резонансная частота датчика.

Значения коэффициентов a и b , соответственно, равны: $a = 0,0084$; $b = 2,134$. При этом

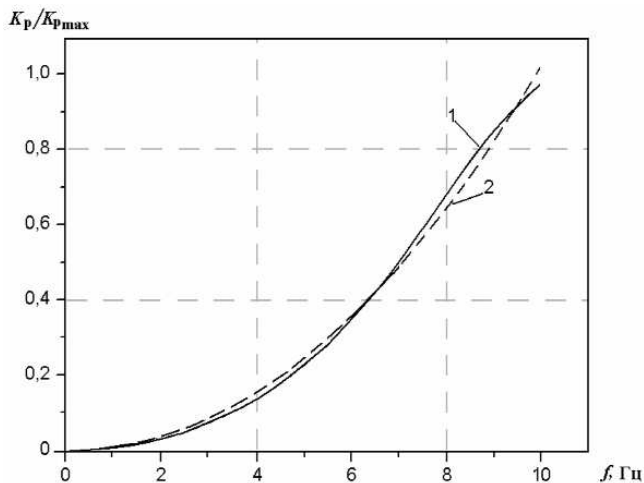


Рис. 2. Начальный участок теоретической зависимости изменения коэффициента преобразования в относительных единицах от частоты (для кривой 4, рис. 1):

1 – расчетная зависимость, согласно выражению (1);
2 – аппроксимирующая зависимость. Значение собственного затухания измерительного устройства $\alpha = 25 \text{ с}^{-1}$. Резонансная частота измерительного устройства 10 Гц

дисперсия для вероятности $p=0,9957$ составляет $\sigma^2 = 0,00047$. Аппроксимирующая зависимость, в соответствии с выражением (2), показана на рис. 2, кривая 2.

Для проверки теоретической зависимости начального участка изменения коэффициента преобразования от частоты (рис. 2) были проведены экспериментальные исследования реальных индукционных датчиков скорости колебаний, в качестве которых использовали датчики типа СВ-10Ц.

Экспериментальные исследования выполнялись на установке, состоящей из двух составных частей: возбуждающей и приемной частей. Состав установки и общая методика исследований показаны на рис. 3. Возбуждающая часть является стандартным вибростендом типа ВЭДС-100МК. Он состоит из системы управления 1 (рис. 3), усилителя мощности сигнала возбуждения 2 и соленоида 3, на который устанавливался исследуемый индукционный датчик 4 скорости колебаний. Система управления вибростендом (СУВ) построена на базе персонального компьютера и анализатора типа А17-УХ. Она обеспечивает формирование и управление параметрами сигнала возбуждения соленоида 3, т. е. управление амплитудой и частотой сигнала возбуждения. Приемная часть стенда построена на базе мобильного компьютера 5 (рис. 3) с программным математическим комплексом 6, который реализуют режим осциллограф, работающего в реальном масштабе времени. При этом обеспечивается возможность измерения параметров регистрируемого сигнала в графическом режиме обработки изображений.

Методика исследований заключалась в следующем. При помощи СУВ (1, рис. 3) производилась установка синусоидального сигнала возбуждения с заданной амплитудой и частотой. Амплитуда синусоидального сигнала возбуждения задавалась неизменной и составляла $U_{вх} = 1 \text{ В}$. Частота

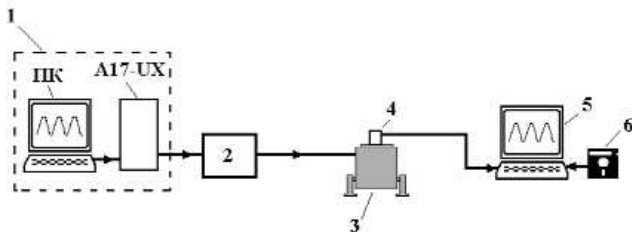


Рис. 3. Схема калибровки амплитудно-частотной характеристики индукционных датчиков скорости колебаний:

1 – система управления вибростендом; 2 – усилитель мощности типа УМК-2000; 3 – соленоид; 4 – индукционный датчик скорости колебаний; 5 – мобильная информационно-измерительная система; 6 – программный математический комплекс; ПК – персональный компьютер; А17-УХ – анализатор

сигнала возбуждения изменялась в диапазоне значений от 10 Гц до 1 Гц. Шаг уменьшения частоты составлял 0,5 Гц. Верхняя частота выбранного диапазона значений соответствовала резонансной частоте исследуемых индукционных датчиков скорости колебаний. Сигнал с выхода СУВ усиливался с использованием усилителя мощности 2 (рис. 3) типа УМК-2000 и поступал на соленоид 3. На столе соленоида жестко устанавливался исследуемый датчик 4. В качестве исследуемых датчиков применялись два датчика типа СВ-10Ц с коэффициентом преобразования, соответственно: датчик № 1 – 19,5 В/м/с; датчик № 2 – 20,3 В/м/с. Синусоидальный сигнал скорости колебаний, возникающий на выходе исследуемых датчиков регистрировался и обрабатывался с использованием мобильной информационно-измерительной системы 5, управление которой осуществлялось при помощи программного математического комплекса 6.

После записи сигнала, регистрируемого на выходе исследуемого датчика, в ПК с использованием программного математического комплекса осуществлялась обработка его параметров в графическом режиме анализа изображения, выведенного на экран монитора. Обработка осуществлялась с измерением амплитуды выходного сигнала датчика на каждой заданной частоте сигнала управления, значение которой определялось с использованием СУВ. По результатам измерений осуществлялось построение зависимости изменения амплитуды выходного сигнала датчика в относительных (приведенных) единицах от частоты, т.е. зависимости вида

$$Y(U'_f / U'_{\max}) = F(f), \quad 0 < f < f_{\max} \quad (3)$$

где U'_f , U'_{\max} – соответственно, значения амплитуды регистрируемого сигнала на заданной частоте и на частоте 10 Гц.

Зависимость (3) соответствует зависимости изменения коэффициента преобразования датчика в относительных единицах от частоты. Это обусловлено следующим. Сигнал на выходе индукционного датчика скорости колебаний $U'(t)$ описывается выражением вида

$$U'(t) = v(t)K_P(f), \quad (4)$$

где $v(t)$ – скорость изменения колебаний поверхности соленоида во времени; K_P – коэффициент преобразования датчика.

Из выражения (4) можно записать

$$K_P = U'(t) / v(t). \quad (5)$$

Так как максимальная амплитуда сигнала возбуждения остается неизменной, то максимальная скорость смещения поверхности соленоида будет постоянной величиной, т.е. $v_m = \text{const}$. При этом на частотах равных и выше резонансной частоты датчика коэффициент преобразования не зависит от частоты и является постоянной величиной, т.е. $K_{Pm} = \text{const}$. Тогда, в соответствии с (5), получим

$$K_{Pm} = U'_m / v_m. \quad (6)$$

Исходя из (5) и (6) для текущего значения частоты возбуждения на частотах ниже резонансной частоты датчика можно записать следующее отношение

$$\frac{K_{Pf}}{K_{Pm}} = \frac{U'_f v_m}{U'_m v_m} = \frac{U'_f}{U'_m}, \quad (7)$$

где K_{Pf} , U'_f – значения коэффициента преобразования датчика и его выходное напряжение на частотах ниже резонансной частоты.

Результаты проведенных исследований для датчика № 1 и № 2 в виде зависимости (3) показаны, соответственно, на рис. 4, а, б. Обработка полученных данных показала, что

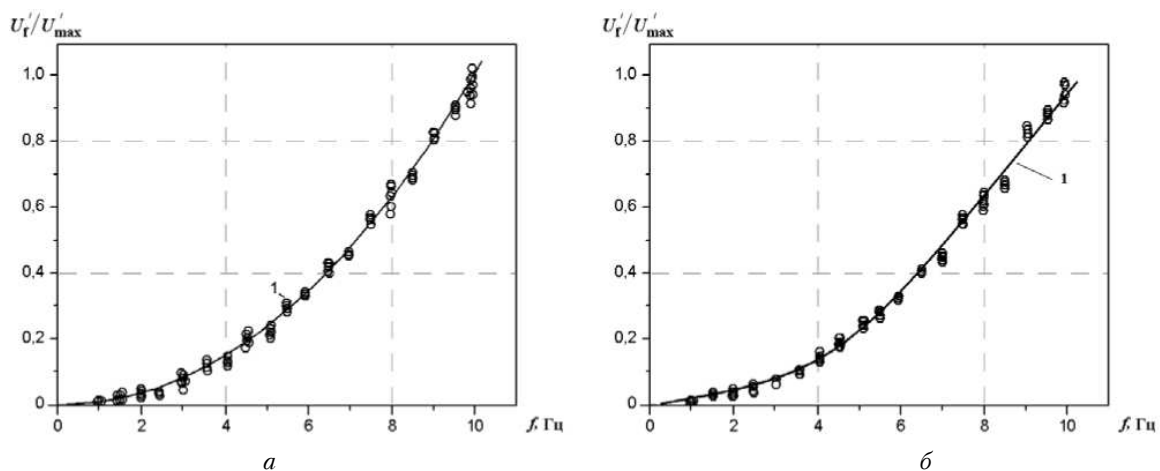


Рис. 4. Начальный участок зависимости изменения коэффициента преобразования от частоты в относительных единицах для индукционных датчиков скорости колебаний:

а – датчик № 1, $K_p = 19,5$ В/м/с; б – датчик № 2, $K_p = 20,3$ В/м/с; 1 – аппроксимирующая зависимость

зависимости (рис. 4), как и теоретических исследований, хорошо аппроксимируются выражением (2). При этом значения коэффициентов в аппроксимирующем выражении имеют следующие значения: для зависимости рис. 4, $a = 0,0075$, $b = 2,074$ с дисперсией $\sigma^2 = 0,00054$ при вероятности $p = 0,9952$; для зависимости рис. 4, $b - a = 0,0065$, $b = 2,024$ с дисперсией $\sigma^2 = 0,00062$ при вероятности $p = 0,9944$.

Таким образом, для исследованных индукционных датчиков скорости колебаний начальный участок зависимости изменения коэффициента преобразования от частоты до резонансной частоты хорошо описывается степенной функцией. При этом значение показателя степени b практически равно двум, $b \approx 2,0$.

Исходя из полученного результата можно записать, что коэффициент преобразования индукционных датчиков скорости колебаний типа СВ-10Ц на начальном участке амплитудно-частотной характеристики до резонансной частоты будет описываться выражением вида

$$K_p = kf^2, 0 < f \leq f_{\max} \quad (8)$$

где k — коэффициент пропорциональности; f_m — резонансная частота индукционного датчика скорости колебаний.

Наличие зависимости (8) позволяет проводить измерение параметров колебаний мостовых конструкций на частотах ниже резонансной частоты индукционных датчиков. Это обеспечивается введением корректировки коэффициента преобразования датчика. При этом корректировка может осуществляться для каждого отдельного датчика с учетом его резонансной частоты и значения коэффициента преобразования на резонансной частоте. Для каждого конкретного датчика проведение корректировки возможно при знании величины коэффициента пропорциональности k , который входит в выражение (8). Его величину можно определить из условия того, что значение коэффициента преобразования для индукционного датчика является нормированной величиной на его резонансной частоте. Если ввести обозначение, что на резонансной частоте коэффициент преобразования равен K_{pm} , то исходя из (8) можно записать

$$K_{pm} = kf_m^2, \quad (9)$$

где K_{pm} — значение коэффициента преобразования на резонансной частоте; f_m — резонансная частота.

Из выражения (9) получим, что коэффициент пропорциональности равен

$$k = \frac{K_{pm}}{f_m^2}. \quad (10)$$

Подставив (10) в (8) получим выражение для определения значения коэффициента

преобразования на частотах ниже резонансной частоты

$$K_p = \frac{K_{pm}}{f_m^2} f^2, 0 < f \leq f_m^2. \quad (11)$$

Заключение

Таким образом, при проведении исследований динамических характеристик конструкций с использованием индукционных датчиков скорости возможно проводить анализ параметров колебаний конструкций на частотах ниже резонансной частоты датчиков. Это обеспечивается за счет корректировки коэффициента преобразования датчиков с учетом фактической частоты колебаний исследуемых конструкций. При этом после регистрации сигналов на выходе индукционных датчиков скорости необходимо проводить их первичную обработку с определением только основной (резонансной) частоты. Если частота колебаний равна или выше резонансной частоты датчика, то осуществляется вторичная их обработка с выводом исходного сигнала и его спектра при значении коэффициента преобразования, равного значению на резонансной частоте датчика, с последующим анализом их параметров. Если частота колебаний ниже резонансной частоты датчика, то производится корректировка коэффициента преобразования на определенной частоте колебаний, согласно (8), а затем выполняется вторичная их обработка с выводом исходного сигнала и его спектра с последующим анализом их параметров. Экспериментальные исследования параметров колебаний конструкций на частотах ниже резонансной частоты индукционных датчиков скорости показали, что ошибка определения динамических смещений с использованием корректировки коэффициента преобразования датчиков не превышает $\pm 5,0\%$, что является приемлемым при проведении исследований динамических характеристик крупногабаритных конструкций.

Литература

1. *Мости: конструкції та надійність* /Й.Й. Лучко, П.М. Коваль, М.М. Корнієв та інші. — Львів: Каменяр, 2005. — 989 с.
2. *Structural load testing and flexure analysis of the route 701 bridge in louisa county, Virginia* /J.Lucas, T.E. Cousins, M.C. Brown and others// Final report VTRC 04-R12. Virginia Transportation research council. June 2004. — 31 p.
3. *Nowak A.S., Eom J., Ferrand D. Verification of girder distribution factors for continuous steel girder bridges/ Final report No. RC-1429. Michigan University. — May 2003. — 235 p.*
4. *Chaallal O., Shahawy M. Experimental evaluation of dynamic amplification for evaluation of bridge*

performance //Technical report No. ETS. DRSR. 98.1. University of Quebec, Canada. June 1998. — 67 p.

5. *Embedment* of structural monitoring algorithms in a wireless sensing unit/ J.P. Lynch, A. Sundararajan, K.H. Law and others// Struct. Eng. And Mechan. — v. 15, No. 3, 2003. — P. 285–297.

6. *Ambient* vibration study of the Gi-Lu cable-stay bridge application of wireless sensing units/ K.C. Lu, Y. Wang, J.P. Lynch and others//Struct. Eng. And Mechan. — v. 19, No. 4, 2006. — P. 174–185.

7. *A study* of the site vibration characteristics for the fechin institute in TAOS, NEW MEXICO/ M.C.H. Rav, B. Hoerst, P.J. Cornwell and others// Report No. 97-1, June 1998. Los Alamos National laboratory. — 15 p.

8. *Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М.* Моделирование динамических характеристик крупногабаритных конструкций // Технологические системы, 2004. — № 2 (22). — С. 31–36.

9. *Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М., Корниенко-Мифтахова И.К.* Информативность параметров сигналов низкочастотных колебаний при использовании индукционных датчиков скорости //Технологические системы, 2005. — № 2(28). — С. 19–23.

10. *Filonenko S., Kornienko-Miftakhova I.* Use of inductive transducers in the low-frequency oscillation section of bridge constructions /Proceedings of the second world congress "Aviation in the XXI-st century" (September 19–21, Kyiv, Ukraine, 2005). — P. 2.51–2.54.

11. *Babak V.P., Filonenko S.F., Kalita V.M., Kornienko-Miftakhova I.K.* Research of Bridge Structure Vibration Characteristics //Вісник НАУ, 2005. — № 2. — С. 5–10.

12. *ГОСТ 28134-89 Е.* Сейсмоприемники электродинамические. Типы, основные параметры и технические требования. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 5 с.