

УДК 264.131.55/138.26

М.Л. ЗОЦЕНКО, О.В. БАНДУРИНА

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка м.Полтава

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛИВАНЬ ГРУНТУ ВІД ВІДСТАНІ ПРИ ЗАБИВАННІ ОДИНИЧНИХ ПАЛЬ

© Зоценко М.Л., Бандуріна О.В., 2006

*Виконано порівняння параметрів коливань визначених за відомими методиками,  
за допомогою математичного моделювання та натурних вимірювань.*

*Has lead comparison of parameters of fluctuations certain on known techniques, by means of  
mathematical modelling and by measurements*

**Постановка проблеми.** Більшість фундаментів в Україні влаштовується із збірних залізобетонних призматичних палей, які занурюють за допомогою молотів різних конструкцій. У зв'язку з тенденцією ведення забудови на вільних майданчиках (або там, де знесено старі будівлі) у межах наявної забудови вивчення динамічного впливу на будівлі й споруди міст і промислових зон, який виникає при зануренні палей, набуває безперечної актуальності.

Проблему безпечного забивання палей поблизу будівель і споруд можна вирішити, лише визначивши, які чинники безпосередньо спричиняють пошкодження будинків і споруд та механізм їхнього виникнення. Це дасть змогу прогнозувати вплив коливань на будівлі і споруди. Дослідження взаємозв'язку між коливаннями ґрунту і пошкодженнями будинків треба починати з дослідження параметрів коливань ґрунту або хвильових полів переміщень, швидкостей або пришвидшення ґрунту під час коливань.

**Аналіз останніх досліджень.** Оцінку параметрів коливань ґрунту при зануренні палей Калюжнюк М.М. [1] виконує доволі приблизно за допомогою формули Б.Б. Голіцина, яка оцінює залежність амплітуди переміщення при забиванні палей від відстані. Аналогічна формула наведена у ВСН 490-87 [2]. Згідно з [1, 3] існує методика розрахунку таких параметрів за характеристиками ґрунту, що одержані при статичному зондуванні ґрунтової товщі. Оскільки ґрунти відрізняються різноманітністю властивостей і характером нашарувань, виявлення хвильових полів майданчиків, де ведуться роботи із забивання палей, це задача, яка точніше може бути розв'язана тільки за допомогою сучасної вимірювальної апаратури та числових методів моделювання на ЕОМ.

**Формування мети роботи.** Метою роботи є порівняння параметрів коливань, визначених розрахунком за переліченими вище методами, з даними, отриманими за допомогою математичного моделювання коливань основ і фундаментів з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) та під час натурних вимірювань.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідний майданчик розташований у центральній частині м. Полтави. У геоморфологічному аспекті ділянка будівництва міститься на конусі виносу балки струмка Полтавка, яка врізана у правобережний корінний схил заплави р. Ворскла. Абсолютні позначки у межах ділянки мають перепад у 4 м. В геологічній будові ділянки бере участь товща тонкошарових пролювіальних глинистих утворень, які залягають на алювіальних пісках. Ґрунти поділені на шість інженерно-геологічних елементів (ІГЕ), у межах яких товща є статистично однорідною за складом і властивостями.

У таких інженерно-геологічних умовах найраціональнішим типом фундаментів є фундаменти із забивних залізобетонних палей із заглибленням вістря палей у ґрунти ІГЕ 4-5. Проектом на будівництво чотирьох секційного житлового прийнято для секції №4 використання палей С11-30 перерізом 30×30

мм, довжиною 11 м, з масою однієї палі – 2500 кг . Занурення залізобетонних паль передбачено дизель молотом С-995 , з масою ударної частини 1250 кг (50 %, від маси палі), маса молота 2700 кг, висотою підняття ударної частини 3 м, з найбільшою енергією удару 22 кДж, при кількості ударів за хвилину 42 удари.

Таблиця 1

**Фізико-механічні характеристики ґрунтів майданчика забудови**

| Назва ґрунту  | Середня потужність шару ґрунту, м | Фізико- механічні характеристики ґрунту |  |   |   |
|---|-----------------------------------|---|--|---|---|
|   |                                   | Модуль деформації ґрунту, Е, МПа        | Питома вага ґрунту, $\gamma_{п}$ , кН/м <sup>3</sup> | Питома зчеплення ґрунту, с <sub>п</sub> , МПа | Кут внутрішнього тертя, $\varphi_{п}$ , ° |
| ПЕ-1 – насипні ґрунти, що складаються із ґрунту, суглинку будівельного і побутового сміття.         | 1,2                               | -                                       | 17,00  | -   | -   |
| ПЕ-2 – глини коричневі, буровато-брунатні, бурі, тверді, нижче за РГВ – м'якопластичні, карбонатні. | 7                                 | 15                                      | 16,37  | 0,033   | 10  |
| ПЕ-3 – суглинки сірі, тугопластичні, з про- шарками піску пилуватого, водонасичені.                 | 2                                 | 14                                      | 19,11  | 0,023   | 21  |
| ПЕ-4 – піски сірі пилуваті, середньої щільності, водонасичені кварцові.                             | 1,3                               | 13                                      | 19,21  | 0,002   | 27  |
| ПЕ-5 – піски зеленувато-сірі, мілкі, щільні, кварцові, водонасичені.                                | 9,1                               | 37                                      | 19,99  | 0,004   | 35  |
| ПЕ-6 – суглинки зеленувато-сірі, синювато-зелені, напівтверді, водонасичені.                        | 2,1                               | 23                                      | 20,69  | 0,030   | 24  |

Для зниження характеристик коливань ґрунту поблизу паль, які занурюють, було передбачено влаштування лідерних свердловин. Свердловини діаметром 300 мм пробурювали БГМ-1 шнековим бурінням до позначки ґрунтових вод, яка становить в середньому 5–6 м.

Для оцінки вібропереміщення ґрунту при зануренні паль залежно від відстані розташування джерела коливань розглянемо декілька методик. Кожна із відомих методик дає можливість лише приблизно оцінити параметри коливань ґрунту і не гарантує достатньої надійності їхньої оцінки. Цей факт пояснюється невичерпним різноманіттям варіантів сполучень ґрунтових нашарувань майданчиків будівництва і властивостей ґрунтів, що утворюють кожен шар ґрунтової товщі. Всі розглянуті методики ґрунтуються на двох спрощених пропозиціях. Перша – імпульсні коливання в кожному розмаху переміщень можуть бути замінені однаковими за частотою і амплітудою гармонічними коливаннями. Друга – для спрощення ґрунт представлено пружним і однорідним середовищем, а енергія пружних коливань поширюється в ньому або як від джерела об'ємних хвиль (амплітуди переміщень зменшуються залежно від відстані як  $1/r$ ) або як від джерела поверхневих або циліндричних хвиль (амплітуди переміщень зменшуються залежно від відстані як  $1/\sqrt{r}$ ).

В ідеально пружному однорідному ізотропному напівпросторі вид і характер коливань, які виникають від лінійного джерела при впливі, що залежить від часу як  $\delta$  – функція Дірака, від відстані не залежать. Амплітуди переміщень зменшуються зі збільшенням відстані як  $1/r^n$ , де  $0,4 < n < 1,0$ . Для немиттєвої дії в напівпросторі спостерігається трансформація імпульсу зі зміною відстані. В ґрунті внаслідок його шаруватості, неоднорідності і неідеальної пружності характер поширення ще складніший. На різних майданчиках зміна параметрів коливань з відстанню може відбуватися по-різному. На деяких з них спостерігається швидке затухання амплітуд переміщень з відстанню, на інших навпаки, амплітуди переміщень зменшуються достатньо повільно. Тому функціональний вигляд залежностей від відстані параметрів коливань ґрунту в загальному випадку

може бути використано лише для грубої їхньої оцінки, що дає уявлення про порядок їх значень або про рівень, який вони не повинні перевищувати.

Зміну амплітуд переміщень зі збільшенням відстані від палі, що забивають, приблизно можна описати формулою Б.Б. Голіцина:

$$A = A_0 (r_0 / r)^{0,5} e^{-\delta(r-r_0)} \quad (1)$$

де  $A$  і  $A_0$  – амплітуди горизонтальної або вертикальної складових переміщень ґрунту на відстанях відповідно  $r$  і  $r_0$ ;  $\delta$  – коефіцієнт затухання коливань,  $m^{-1}$  за даними [2] за табл. 2 для твердих глин і суглинків він становить  $0,03 m^{-1}$ ;

Згідно з [2] коефіцієнт затухання коливань ґрунту за відстанню приймають за табл. 2 і уточнюють за даними вимірювань згідно з п. 10.

Коефіцієнт  $\delta$ , визначається за результатами вимірювань параметрів коливань і розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{\ln \left( \frac{A_1}{A_2} \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \right)}{r_2 - r_1} \quad (2)$$

де  $A_1$  і  $A_2$  – амплітуди переміщення ґрунту на відстанях  $r_1$  і  $r_2$ .

Щоб скористатися (2), потрібно знати амплітуду переміщення ґрунту на будь-якій визначеній відстані від палі, що занурюють, дані наведені в табл. 1. З одного боку, перевагою формули (1) є простота, а з іншого боку – гнучкість при апроксимації її за допомогою результатів спостережень амплітуд переміщень на різних майданчиках будівництва, які утворені різними ґрунтами. Ця гнучкість досягається за рахунок можливості введення у неї різних значень  $A_1$  зокрема виміряних на відстані  $r_1$  і за рахунок підстановки різних значень коефіцієнта затухання залежно від ґрунтових умов майданчика будівництва.

Таблиця 2

**Розрахунок максимальних вібропереміщень за формулою Голіцина Б.Б залежно від відстані**

| Відстань від місця забивання палі до місця вимірювання, м | Частота, Гц | Коефіцієнт затухання, за формулою (2) | Максимальне вібропереміщення за формулою Б.Б. Голіцина, мм |
|---|-------------|---------------------------------------|--|
| 5   | 11,27       | 0,00482                               | 0,140  |
| 10  | 11,27       | 0,00481                               | 0,100  |
| 15  | 11,27       | 0,00592                               | 0,083  |
| 20  | 11,27       | 0,00598                               | 0,074  |
| 25  | 11,27       | 0,00619                               | 0,069  |
| 30  | 11,27       | 0,00619                               | 0,065  |
| 35  | 11,27       | 0,00702                               | 0,064  |
| 40  | 11,27       | 0,00696                               | 0,062  |
| 45  | 11,27       | 0,00001                               | 0,047  |

Серед інших методик орієнтовних розрахунків параметрів коливання ґрунту, що поширюються від палі під час їхнього занурення молотом, існує методика їхнього розрахунку за характеристиками ґрунту, що визначені при статичному зондуванні ґрунтової товщі майданчика будівництва. Методика оснований на залежностях між параметрами коливань поверхні ґрунту і його характеристиками міцності, що одержані при статичному зондуванні. Для забивання палі в піщані і глинисті ґрунти формули розрахунку параметрів коливань відрізняються коефіцієнтами, що входять у формулу. Наведена нижче формула для орієнтовних розрахунків максимальної швидкості

одержані за результатами статичного зондування ґрунту декількох будівельних майданчиків і натурних вимірювань параметрів коливань поверхні ґрунту від забивання паль.

Згідно з методикою розрахунку за характеристиками ґрунту, що одержані при статичному зондуванні ґрунтової товщі очікуваний рівень швидкості коливань ґрунту при зануренні паль визначаємо за формулою [1, 3]:

$$V_{max} = k_{vmax} q_s (2/r)^{tgv} \quad (3)$$

тоді максимальне вібропереміщення визначаємо за формулою:

$$A_{max} = \frac{0,16 \cdot k_{vmax} q_s (2/r)^{tgv}}{\omega} \quad (4)$$

де  $k_{vmax}$  – коефіцієнт, що залежить від джерела коливань та виду ґрунту, для паль  $k_{vmax} = 0,8$  (піщаний ґрунт) або  $0,75$  (глинистий ґрунт);  $q_s$  – опір зануренню конуса зонда при статичному зондуванні, МПа. Для секції №4 свердловини №1 на глибині 11м опір зануренню конуса зонда при статичному зондуванні становить 13,1 МПа;  $r$  – відстань від палі до точки, в якій визначають параметри коливань, м;  $\omega$  – частота коливань ґрунту, Гц;  $tgv$  – показник степеня, який залежить від характеристик верхнього шару ґрунту завтовшки 5–10 м. На будівельному майданчику секції №4 верхній шар ґрунту утворюють глинисті ґрунти від пластичної до твердої консистенції тобто  $tgv = 0,6 - 0,8$ . Дані розрахунку за (4) наведено у табл. 2.

Для розв'язання задачі моделювання коливань ґрунту на різних відстанях при забиванні паль використано програмний комплекс "CONCORD", розроблений професором С.Ф. Клованичем з участю фахівців Полтавського НТУ ім. Ю. Кондратюка. При побудові моделі, ґрунт розглядається як суцільне середовище, яке володіє властивостями фізичної нелінійності, що описується за допомогою деформаційної теорії пластичності. У програмному комплексі реалізований статичний підхід до задачі динаміки. Реалізація такого підходу ґрунтується на принципі методу кінестатики (розглядаючи систему сил користуються принципом Ж. Д'Аламбера) з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). "CONCORD" теоретично описує комп'ютерні дії з використанням простої оболонки.

Застосування статичного методу оцінки динамічного напружено деформованого стану системи "основа-фундамент" за допомогою програмного пакета "CONCORD" передбачає:

- врахування інерції до шару ґрунту;
- врахування часу дії навантаження на фундамент;
- можливість застосування будь-якої моделі основи;
- врахування вологості ґрунту;
- графічне подання результатів.

Будь-які розрахунки можуть використовуватися лише для попередньої оцінки, тому що майже завжди можна спостерігати немонотонний характер зміни амплітуд переміщень з відстанню, який важко описати формулою [1]. Тому розрахунки динамічних характеристик за вищерозглянутими методиками були перевірені вимірюваннями. Для замірів параметрів коливань ґрунту використано віброметр 107В. Віброметр 107В – автономний, мікропроцесорний вимірювальний прилад призначений для вимірювання параметрів коливань: вібропришвидження, віброшвидкості та вібропереміщення. Одночасно здійснювався спектральний аналіз сигналу вібрації. Для вимірювань було використано акселерометр п'єзоелектричного типу ДН-3 зав. №1155 із коефіцієнтом перетворення  $15,86$  пКл  $c^2/m$ . Динамічний діапазон вимірювання середньоквадратичних значень вібропришвидження, віброшвидкості та вібропереміщення обмежений зверху максимальним значенням вхідного сигналу, а знизу рівнем власних шумів підсилювача сигналу і залежить від коефіцієнта перетворення. Межі відносної похибки при вимірюванні сигналу (без врахування похибки акселерометра) становлять  $\pm 5\%$ . Частотний діапазон спектрального аналізу від  $10$  Гц до  $10000$  Гц. Кріплення акселерометра на ґрунт здійснювалося за

допомогою ручного щупа, забезпечувалася верхня межа робочого частотного діапазону до 900 Гц. Для визначення напрямку поширення хвиль де динамічні характеристики коливань ґрунту найбільші, давачі акселерометра встановлювали у горизонтальному і вертикальному положеннях. Визначили, що вібропереміщення, віброшвидкість і вібропришвидження вертикальних коливань ґрунту більше від горизонтальних на 9 – 12 %. Тому досліджували вертикальні коливання ґрунту. Щуп закріплювали до давача акселерометра за допомогою різьбового з'єднання і занурювали у ґрунт вертикально, давач акселерометра був розміщений на поверхні ґрунту. Так вимірювали параметри коливань ґрунту у трикратному повторенні згідно з п. 4.5 [4].

У табл. 2 наведено результати розрахунку максимальних вібропереміщень залежно від відстані за формулою Б.Б. Голіцина, за даними статичного зондування, моделювання за допомогою програмного комплексу “CONCORD”, а також дані середнього значення максимальних вібропереміщень.

Таблиця 3

**Результати розрахунку максимального вібропереміщення різними методами залежно від відстані палі С11-30**

| За формулою Б.Б. Голіцина        |                                  | За даними статичного зондування |                                  | За програмним комплексом “CONCORD” |                                  | За даними вимірювання            |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Відстань до місця вимірювання, м | Максимальне вібропереміщення, мм | Відстань до місця вимірювання   | Максимальне вібропереміщення, мм | Відстань до місця вимірювання, м   | Максимальне вібропереміщення, мм | Відстань до місця вимірювання, м | Максимальне вібропереміщення, мм |
| 5                                | 0,140                            | 5                               | 0,734                            | 4,31                               | 0,13                             | 5                                | 0,140                            |
| 10                               | 0,100                            | 10                              | 0,452                            | 9,5                                | 0,089                            | 10                               | 0,123                            |
| 15                               | 0,083                            | 15                              | 0,340                            | 14,7                               | 0,1                              | 15                               | 0,125                            |
| 20                               | 0,074                            | 20                              | 0,278                            | 19,89                              | 0,083                            | 20                               | 0,110                            |
| 25                               | 0,069                            | 25                              | 0,238                            | 25,08                              | 0,079                            | 25                               | 0,099                            |
| 30                               | 0,065                            | 30                              | 0,210                            | 30,27                              | 0,082                            | 30                               | 0,087                            |
| 35                               | 0,064                            | 35                              | 0,188                            | 35,46                              | 0,059                            | 35                               | 0,078                            |
| 40                               | 0,062                            | 40                              | 0,171                            | 39,62                              | 0,063                            | 40                               | 0,063                            |
| 45                               | 0,047                            | 45                              | 0,158                            | 44,81                              | 0,062                            | 45                               | 0,051                            |

За даними табл. 3 побудуємо графік залежності максимального вібропереміщення поверхні ґрунту від відстані до місця занурення палі, який наведено на рис. 1.

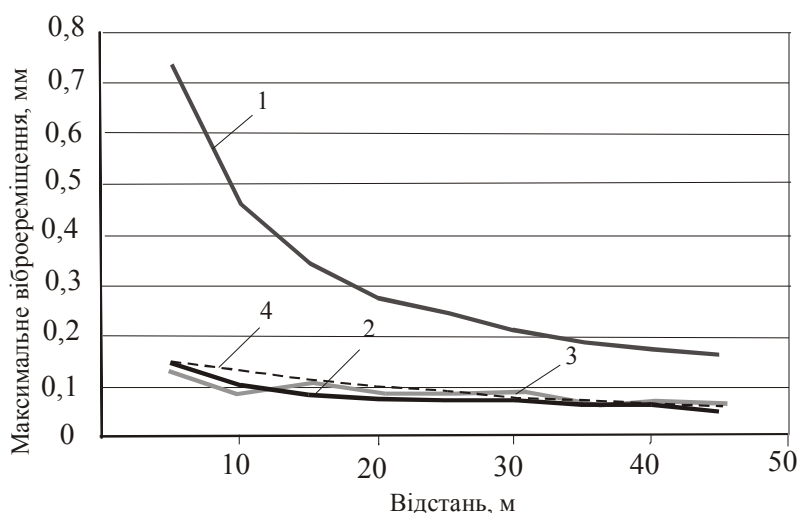


Рис. 1. Графік залежності максимального вібропереміщення від відстані до палі С11-30 за даними: 1 – статичного зондування; 2 – формули Б.Б. Голіцина; 3 – математичного моделювання; 4 – вимірювань

Відповідно до наведених результатів, розрахунки за даними статичного зондування дають завищені результати у 5,2 раза порівняно з даними вимірювання вібропереміщень. Розходження між результатами розрахунків за формулою Б.Б. Голіцина, з урахуванням розрахованого коефіцієнту затухання коливань у ґрунті будівельного майданчика, даними моделювання на ЕОМ і вимірними значеннями незначна.

При оцінюванні збіжності вимірних і розрахованих за програмним комплексом даних вібропереміщення ґрунту визначений критерій Фішера становив  $F = 1,33$ , що значно менше ніж його критичне значення  $F_{\text{крит}} = 4,49$ . На цій підставі робимо висновок, що дані розраховані за програмним комплексом "CONCORD" і отримані під час натурних вимірювань задовільно збігаються.

Оцінимо вплив вібрації від забивання паль дизель-молотом свердловини на будинки, що розташовані поблизу. Згідно з табл. 2 [2] допустиме вібропришвидження коливань фундаменту для III категорії ґрунтів основи (ПЕ 2 – глини брунатні, бурі тверді при зволоженні переходять у м'якопластичний стан) становить  $0,15 \text{ м/с}^2$ . Згідно з (2), додаток 2 [2] допустиме вібропереміщення фундаменту становить:

$$A = \frac{0,025a}{\omega^2} = 0,03 \text{ мм} \quad (5)$$

де  $a$  – пришвидження коливань,  $\text{мм/с}^2$ ;  $\omega$  – частота коливань, Гц.

Проаналізуємо вплив лідирування на зниження коливань ґрунту. Результати вимірювання вібропереміщень ґрунту при зануренні паль у лідерні свердловини і без лідирування подано у табл. 5.

Таблиця 5

**Результати вимірювання вібропереміщень ґрунту при зануренні паль**

| Відстань від місця<br>Занурення палі до<br>місця вимірювання, м | Середнє значення вібропереміщення ґрунту, мм |                                  |   |
|---|--|----------------------------------|---|
|   | До занурення палі                            | При зануренні без<br>лідирування | При зануренні з<br>лідерною<br>свердловиною<br>глибиною 4 м |
| 5   | 0,0088                                       | 0,213                            | 0,140   |
| 45  | 0,0062                                       | 0,075                            | 0,051   |

Середнє значення максимального вібропереміщення за даними вимірювання на відстані 45 м від місця забивання палі з лідером глибиною 4 м становить  $0,051 \text{ мм}$ , що більше від допустимого вібропереміщення. Тому згідно з чинними нормами ВСН 490-87 [2] забивання паль неможливо здійснювати на відстані до 45 м від будівель. Допустиму відстань від забудови до місця забивання паль необхідно визначати додатково.

**Висновки**

– Серед даних, визначених вище за розглянутими методиками, спостерігаємо тенденцію зменшення значень максимального вібропереміщення зі збільшенням відстані.

– Згідно з розрахунками за даними статичного зондування маємо завищені результати у 5,2 раза порівняно з даними вимірювання вібропереміщень, це свідчить про недоцільність використання цієї методики.

– Розходження між результатами розрахунку за формулою Б.Б. Голіцина, з урахуванням розрахованого коефіцієнта затухання коливань у ґрунті будівельного майданчика, даними моделювання на ЕОМ і вимірними значеннями незначна, але статистична обробка результатів розрахунку показала максимальну збіжність даних, розрахованих за програмним комплексом „CONCORD” і вимірних даних вібропереміщень ґрунту, що підтверджує можливість використання методу МСЕ для розв’язання динамічних задач.

– Ефективним методом зниження коливань ґрунту при динамічному зануренні паль є попереднє лідирування свердловин бурінням свердловин діаметром, що дорівнює стороні поперечного перерізу призматичної палі до встановленої глибини.

1. Калюжнюк М.М. Рудь В.К. *Сваебойные работы при реконструкции: (Влияние колебаний на здания и сооружения)*. – Л., 1989. 2. ВСН 490-87. *Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки*, М., 1988. 3. *Фундаменти будівель і споруд: Довід. Посібник* Ю.Л. Винников, В.А. Муха, А.В. Яковлев та ін. – К., 2002. 4. ДСН 3.3.6.039-99. *Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації*.

УДК 621.314:621.396.66

І.Ю. ІСАЄВ<sup>1</sup>, І.Б. КРАВЕЦЬ<sup>1</sup>, Г.Т. ЧЕРЧИК<sup>1</sup>, І.М. ЯВОРСЬКИЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів,

<sup>2</sup>Institute of Telecommunications, University of Technology and Agriculture, Bydgoszcz, Poland

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯРНОЇ ТА ВИПАДКОВОЇ СКЛАДОВИХ СИГНАЛУ ВІБРАЦІЇ ПІДШИПНИКА КОЧЕННЯ

© Ісаєв І.Ю., Кравець І.Б., Черчик Г.Т., Яворський І.М., 2006

*Виконано відбір вібраційних сигналів бездефектного і дефектного підшипників кочення на механічному випробувально-діагностичному стенді. Запропоновано нестационарну модель сигналів вібрації у вигляді адитивної суми регулярної та випадкової складових.*

*Здійснено аналіз випадкової складової і показано, що в ній не містяться приховані періодичності. Це дає змогу виявляти дефекти підшипника кочення лише за регулярною складовою вібраційних сигналів.*

*Vibration signals sampling for ideal and faulty frictionless bearings are fulfilled on the basis of mechanical diagnostic test bench. Non-stationary model for vibration signals in the form of regular and random components additional sum is suggested. Analysis for model random component is carried out. Absence of hidden periodicities in the random component is shown. This result allows us to carry out frictionless bearing defect identification only on the basis of regular component.*

Вібрації, що виникають в роботі механізмів обертової дії, переважно генеруються через наявність у системі дефектів монтажу, неспіввісності та дисбалансу, що призводять до порушення внутрішньої геометрії підшипникового вузла і розвитку пошкоджень на внутрішній та зовнішній доріжках, тілах кочення та сепараторі. Сили, що виникають внаслідок розвитку пошкоджень поверхні і складових частин підшипника, мають як регулярний, так і випадковий характер, що проявляються у мультитопіковості стаціонарної спектральної густини та характерній формі кореляційної функції. Здійснити розділення регулярної та випадкової складових сигналів вібрації у межах моделі стаціонарних випадкових процесів не видається можливим [1–3], тому необхідно використовувати адекватні нестационарні імовірнісні моделі [4–7].

Моделі періодично та майже-періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП та МПКВП відповідно) описують як регулярні, періодичні коливання, так і випадкові, стохастичні зміни у характері коливань [2,3]. Математичне сподівання ПКВП та МПКВП описує детерміновану складову вібрації механічної системи, а коефіцієнти  $m_k$  є параметрами форми цієї складової.

$$m(t+T) = m(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} m_k e^{ik\omega_0 t}, \quad \omega_0 = 2\pi/T.$$