

## МАШИНИ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ

УДК 631.3:62-231.3

### АНАЛІЗ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БОЛТОВОГО З'ЄДНАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

**Я. М. Михайлович, кандидат технічних наук  
ORCID iD-0000-0001-5864-9855**

**Національний університет біоресурсів і  
природокористування України**

**А. М. Рубець, кандидат технічних наук  
ORCID iD-0000-0001-5864-9856**

**Білоцерківський національний аграрний університет  
e-mail: yaroslav\_m@ukr.net; a-rubets@ukr.net**

**Анотація.** Запропоновано підхід до вивчення питання забезпечення необхідного технічного ресурсу болтового з'єднання на основі аналізу вібрації головки болта і гайки. Отриману графічну залежність енергії та потужності вібрації болтового з'єднання можна використовувати для приведення у відповідність необхідних параметрів різьбових з'єднань умовам роботи машин.

В дослідженні бралась до уваги вібрація опорних поверхонь головки болта та гайки у взаємно перпендикулярних напрямках (у площинах, перпендикулярних до осі різьбового стрижня). Дана вібрація є результатом дії рухомих мас робочих органів, технологічного матеріалу та впливу явища дисипації. Вібрація є вимушеною і існує завдяки балансу енергії, що надходить до коливальної системи та енергії, затраченої на тертя.

На основі аналізу вібрації опорної поверхні головки болта і гайки введено поняття «синхронного» та «несинхронного» з'єднання. Числовий аналіз вібрації різьбового з'єднання сільськогосподарської техніки дозволяє судити про навантаженість різьбового з'єднання поперечною вимушеною силою та кутовими відносними коливаннями опорних поверхонь головки болта і гайки.

Дослідження актуальні для використання у симулятивному моделюванні даного процесу, яке дозволить прогнозувати ресурс різьбового з'єднання, планувати профілактичні дії та досягти максимальної відповідності необхідних параметрів різьбових з'єднань умовам роботи машини.

© Я. М. Михайлович, А. М. Рубець, 2018

**Ключові слова:** *різьбове з'єднання, вібрація, кінематика, сільськогосподарська техніка*

**Постановка проблеми.** Понад 60 % з'єднань сучасної сільськогосподарської техніки складають різьбові [1]. На відміну від стаціонарних машин всі різьбові з'єднання сільськогосподарської техніки знаходяться під впливом вібраційних навантажень у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Вплив такого характеру вібрації на працездатність з'єднання потребує подальших наукових досліджень.

**Аналіз останніх досліджень.** Для забезпечення ефективного використання різьбових з'єднань виконують розрахунок їх параметрів залежно від умов використання, характеру навантаження, необхідності технічного обслуговування вузла тощо. Основним параметром донедавна слугувало необхідне зусилля притискання з'єднаних деталей, що не в повній мірі відповідало експлуатаційним параметрам [2, 4, 7].

**Мета досліджень** – виконати аналіз кінематичних параметрів болтового з'єднання сільськогосподарської техніки.

**Результати досліджень.** Об'єктом дослідження є вібрація різьбового з'єднання сільськогосподарської техніки. Результати досліджень отримано з використанням методів теоретичної механіки, математичного аналізу, статистичної обробки.

За умовами роботи різьбові з'єднання сільськогосподарської техніки можна поділити на наступні групи, які працюють під впливом:

- поперечних кутових коливань;
- поперечних лінійних коливань;
- повздовжніх коливань;
- комплексних коливань.

Під впливом вищенаведених навантажень опорна поверхня гайки і головки болта виконує складні рухи навколо власного положення рівноваги: поступальний рух вздовж координатних осей і обертальний рух навколо координатних осей. Внаслідок цього гайка і болт зазнають кутових і лінійних переміщень, аналіз яких дозволить виявити критичні режими роботи різьбового з'єднання.

Процес послаблення у чотирьох випадках виникатиме наступним чином. Взаємні кутові переміщення різьбового стрижня і гайки (перший випадок) виникатимуть за умови відповідного характеру вібрації з'єднаних деталей. Для кутових коливань можна виділити наступні критичні випадки:

1) виникнення взаємних кутових переміщень внаслідок статичних або динамічних крутих коливань з'єднаної деталі

(опорної поверхні гайки) навколо нейтральної лінії різьбового стрижня;

2) наявність таких коливань з'єднаних деталей у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, за яких у складному русі опорної поверхні гайки виникатиме повертання гайки відносно різьбового стрижня.

Поперечні лінійні коливання відбуватимуться до появи взаємного переміщення з'єднаних деталей: зростання вимушеного зусилля до значення сил тертя між з'єднаними деталями або між деталлю і опорною поверхнею головки болта (гайки).

Повздовжні коливання різьбового з'єднання можуть спричинити розкриття контакту між з'єднаними деталями у випадку дії повздовжньої вимушеної сили, більшої ніж сила притискання.

Комплексна дія вібраційного навантаження найбільш відповідає умовам роботи складної сільськогосподарської техніки і є сумою впливу трьох інших навантажень.

Колівання з'єднаних деталей мають різні параметри до моменту надання необхідного зусилля їх притискання. Після монтажу з'єднання не значні коливання поглинаються, а залишаються коливання робочі, вплив яких на різьове з'єднання є домінуючим.

Рух точки, яка лежить на перетині площини опорної поверхні гайки (головки болта) і нейтральної лінії різьбового стрижня, буде задаватись характером вібрації з'єднуваної деталі, на яку опирається гайка, як результат коливань, отриманих від деталей і механізмів, що надійшли до цього з'єднання.

Заміряні на сільськогосподарській машині коливання різьбового з'єднання на поверхнях  $O_1$  та  $O_2$  (рис. 1) можна звести до найпростішої параметричної форми [3]:

$$\begin{cases} x_1 = a_{1.1} \cos(\omega_{1.1} t + \varphi_{1.1}) \\ y_1 = a_{1.2} \cos(\omega_{1.2} t + \varphi_{1.2}) \\ z_1 = a_{1.3} \cos(\omega_{1.3} t + \varphi_{1.3}) \end{cases} \begin{cases} x_2 = a_{2.1} \cos(\omega_{2.1} t + \varphi_{2.1}) \\ y_2 = a_{2.2} \cos(\omega_{2.2} t + \varphi_{2.2}) \\ z_2 = a_{2.3} \cos(\omega_{2.3} t + \varphi_{2.3}) \end{cases}. \quad (1)$$

У випадку, коли  $z_1 = 0$  та  $z_2 = 0$  маємо плоский рух на опорній поверхні головки болта та гайки:

$$\begin{cases} x_1 = a_{1.1} \cos(\omega_{1.1} t + \varphi_{1.1}) \\ y_1 = a_{1.2} \cos(\omega_{1.2} t + \varphi_{1.2}) \end{cases} \begin{cases} x_2 = a_{2.1} \cos(\omega_{2.1} t + \varphi_{2.1}) \\ y_2 = a_{2.2} \cos(\omega_{2.2} t + \varphi_{2.2}) \end{cases}. \quad (2)$$

В певних співвідношеннях початкових фаз  $\varphi_{1.1}, \varphi_{1.2}; \varphi_{2.1}, \varphi_{2.2}$  кругових частот  $\omega_{1.1}, \omega_{1.2}; \omega_{2.1}, \omega_{2.2}$  та амплітуд  $a_{1.1}, a_{1.2}; a_{2.1}, a_{2.2}$  вісь болта  $O_1 O_2$  виконуватиме кутові коливання навколо положення рівноваги. На теперішній час отримано теоретичні залежності кінематичних параметрів різьбових з'єднань в умовах просторової вібрації [5, 6].

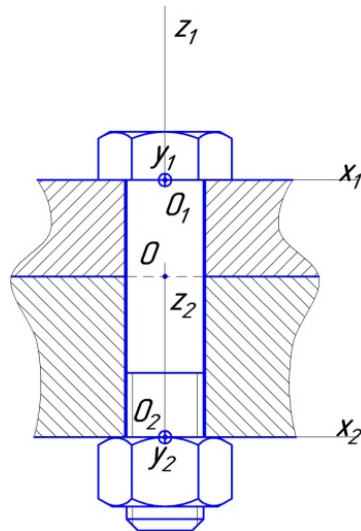


Рис. 1. Ескіз різьбового з'єднання (осі  $O_1Y_1$  та  $O_2Y_2$  направлені в бік спостерігача).



Рис. 2. Вимірювання вібрації болтів зернозбирального комбайна в трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Для виявлення реальних характеристик вібрації різьбових з'єднань було записано вібрацію в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. На основі аналізу запису вібрації 3-D блоками датчиків під головкою болта та гайкою виявлено, що за характером вібрації заміряної у відповідних напрямках X, Y, Z різьбові з'єднання можна розділити на дві групи:

1-з'єднання, різниця коливань в яких у відповідних напрямках між опорною поверхнею болта і гайки відрізняється від нуля;

2- з'єднання, різниця коливань в яких у відповідних напрямках між опорною поверхнею болта і гайки мало відрізняється від нуля і нею можна знехтувати.

До першої групи з'єднань належать з'єднання просторових конструкцій та з'єднання з сумарною товщиною з'єднуваних деталей:

$$l_1 + l_2 > 7d,$$

де:  $d$  – номінальний діаметр різьби.

Для ґрунтового опису даних груп введемо поняття «синхронне з'єднання» – з'єднання групи 2, «не синхронне з'єднання» – з'єднання групи 1.

На графіку (рис. 3) і подальших під номером 1 зображені залежності по «Х» під номером 2 зображені залежності по «Y».

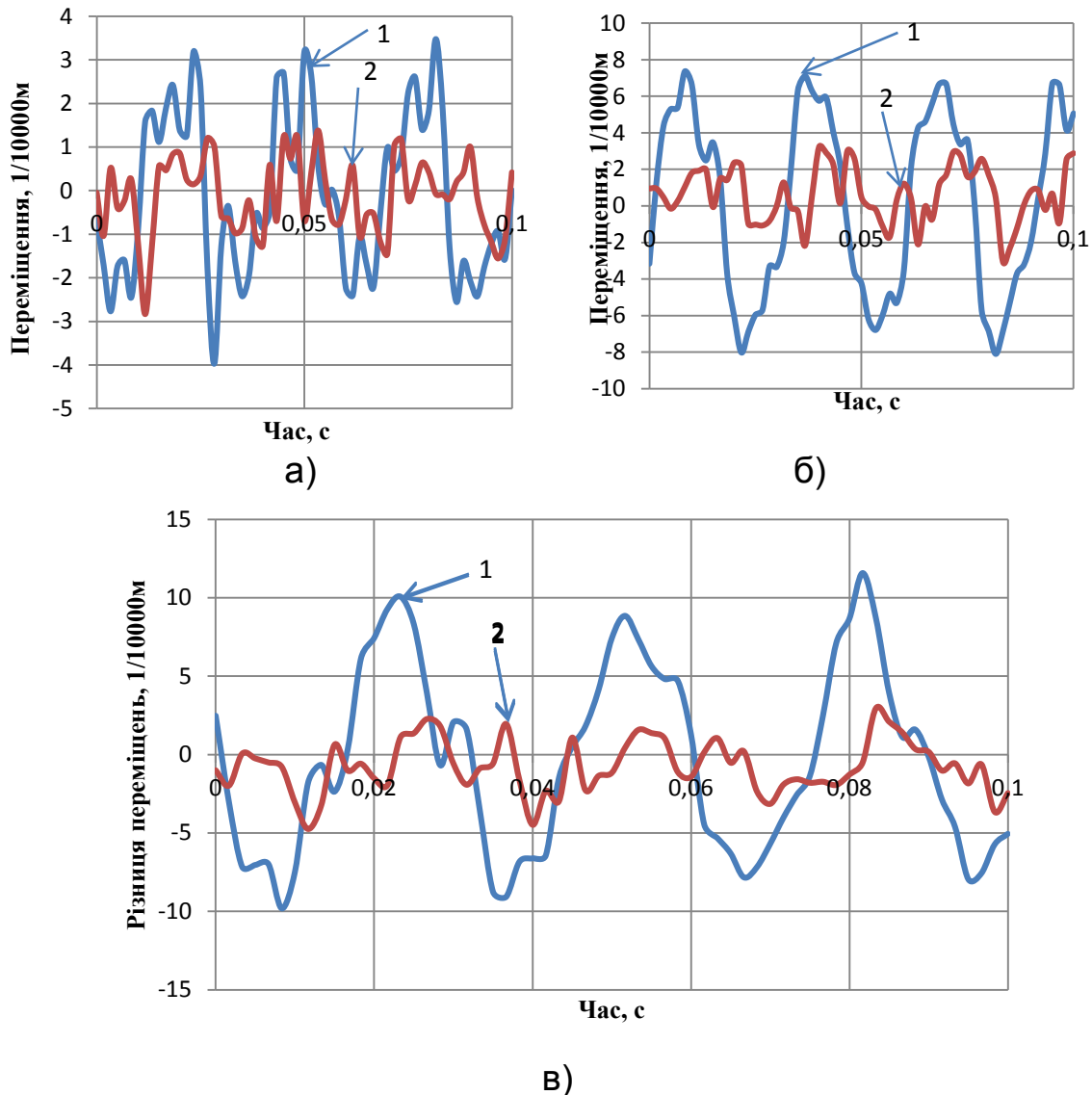


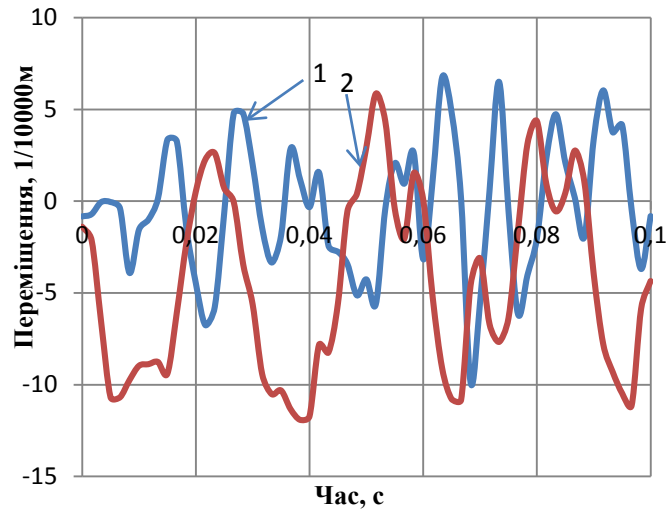
Рис. 3. Коливання опорної поверхні гайки  $O_1$  (а), головки болта  $O_2$  (б) та різниця переміщень напрямків  $X_1-X_2$ ;  $Y_1-Y_2$  не синхронного з'єднання.

Крім амплітуд, частот та початкових фаз кутові коливання навколо положення рівноваги не синхронного з'єднання залежатимуть від сумарної товщини з'єднаних деталей  $L$ .

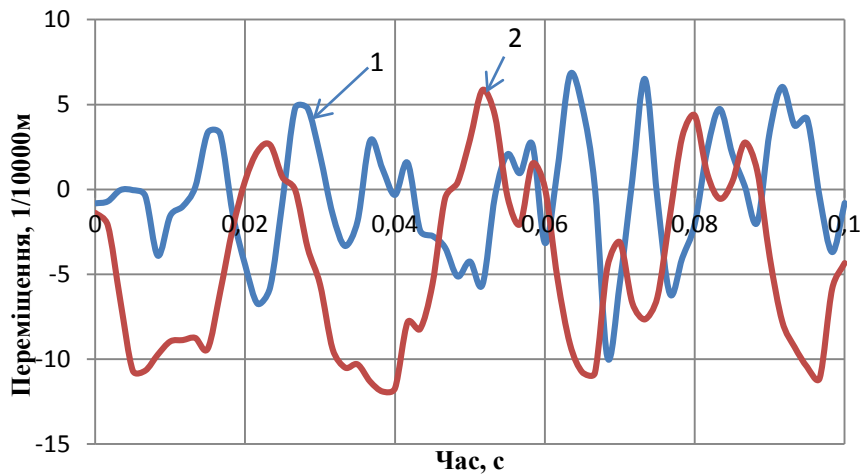
Величину кутів можна визначити з наступної залежності:

$$\varphi_x = \arctg\left(\frac{\Delta x}{L}\right), \varphi_y = \arctg\left(\frac{\Delta y}{L}\right),$$

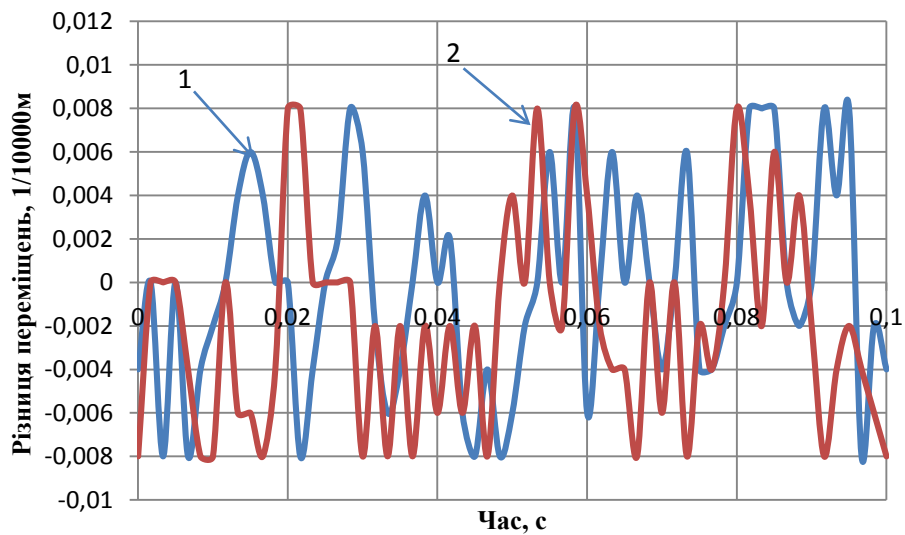
де:  $L = l_1 + l_2$  – товщина з'єднаних деталей, м.



а)



б)



в)

Рис. 4. Коливання опорної поверхні гайки  $O_1$  (а), головки болта  $O_2$  (б) та різниця переміщень напрямків  $X_1 - X_2$ ;  $Y_1 - Y_2$  (в) синхронного з'єднання.

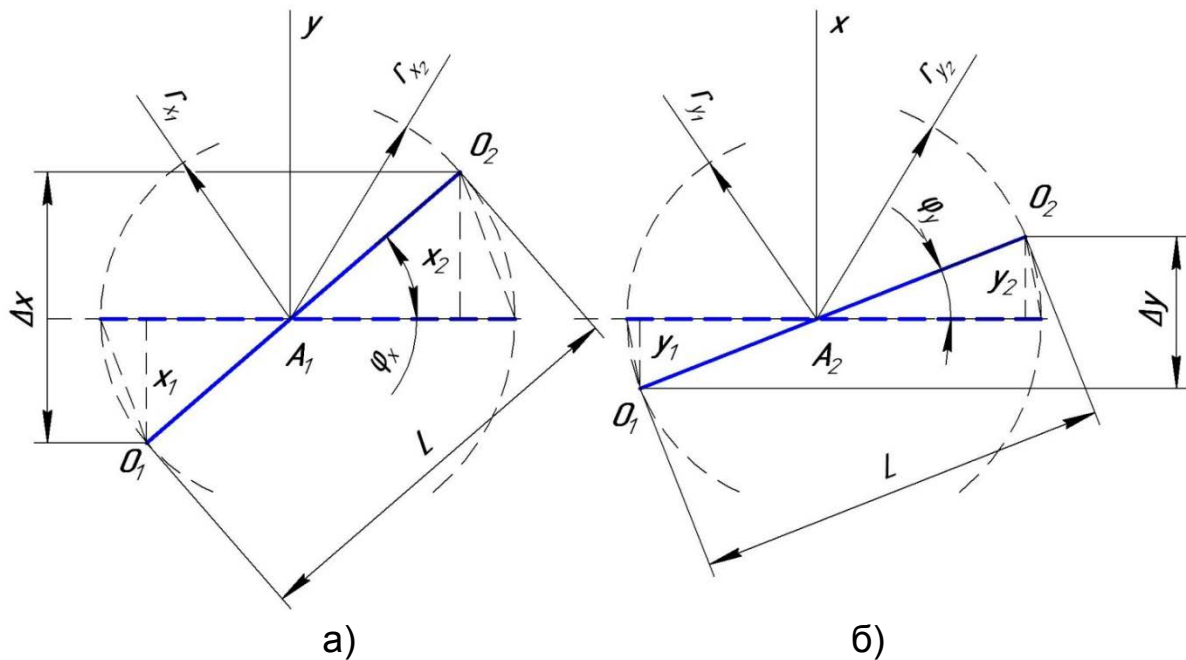


Рис. 5. Схема для визначення кута між віссю болта та віссю OX (а) та віссю OY (б).

Кутові переміщення не синхронного з'єднання мають стрімкі піки та сталі значення на певному значенні кута (рис. 6, а).

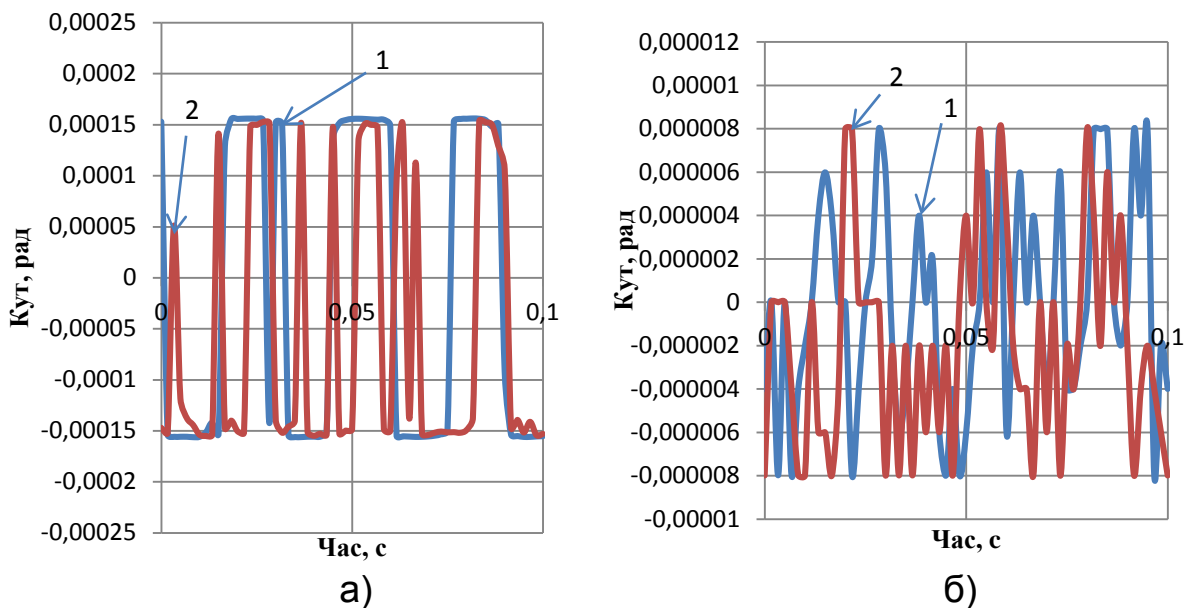


Рис. 6. Зміна кута між осьюовою лінією болта і лінією рівноваги не синхронного (а) та синхронного (б) з'єднання.

Під час вібрації синхронного з'єднання кутових коливань не виникатиме оскільки точки  $O_1$  та  $O_2$  виконуватимуть синхронний рух у напрямках відповідних осей (рис. 6, б). У координатних осях XY точки, що лежать на перетині площин опорних поверхонь головки болта і

гайки та нейтральної лінії різьбового стрижня виконуватимуть складний рух (рис. 7). Дане явище відбуватиметься до моменту послаблення різьбового з'єднання. У загальному випадку коливальної системи болтового з'єднання точки  $O_1$  та  $O_2$  виконуватимуть рух в площинах  $X_1Y_1$  та  $X_2Y_2$  відповідно (за залежностями  $y_1(x_1)$  та  $y_2(x_2)$  відповідно).

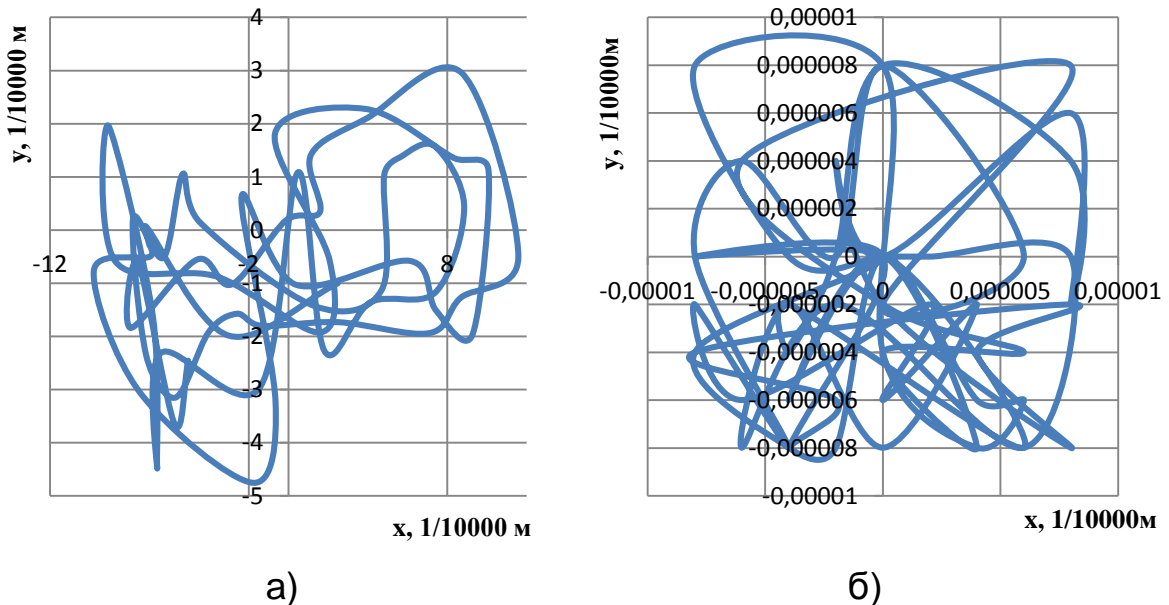


Рис. 7. Рух точок  $O_1$  в координатних осях  $XY$  для не синхронного (а) та синхронного (б) з'єднання.

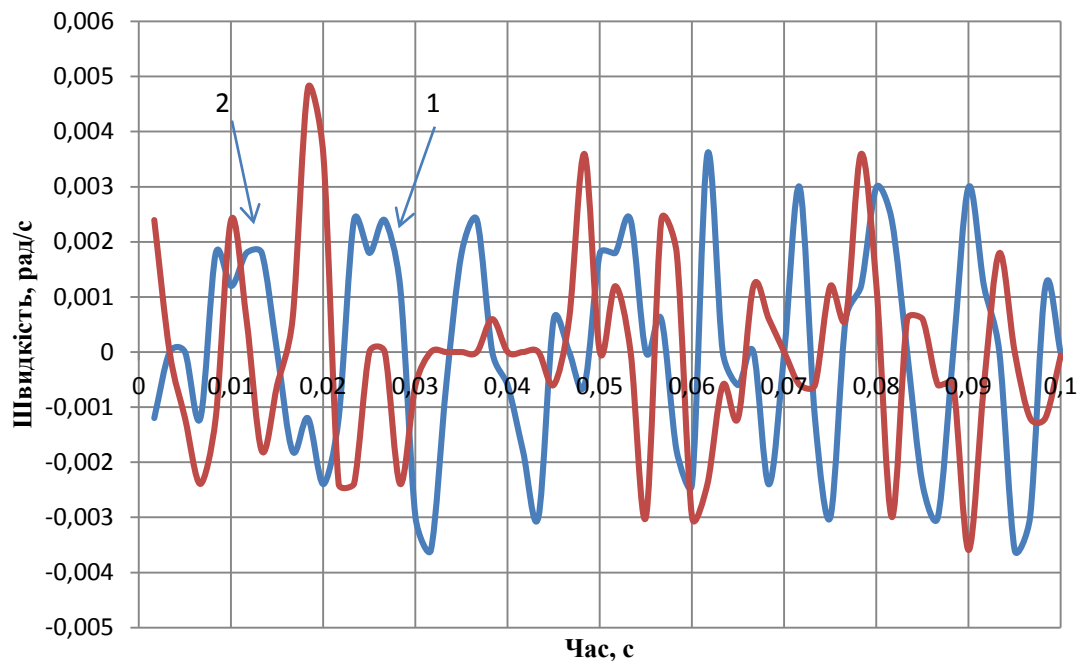


Рис. 8. Кутова швидкість осі синхронного болтового з'єднання, рад/с.



Кутові швидкості осі болта для синхронного з'єднання вираховані чисельним методом і лише в окремих випадках досягають до 0,003 рад/с (рис. 8), що підтверджує дану особливість синхронного з'єднання.

Для не синхронного з'єднання спостерігаються стрімкі зростання та нульові значення протягом окремих періодів. Максимальні значення кутової швидкості складають 0,092 рад/с.

Питома кінетична енергія різьбового з'єднання запишеться з відомої залежності:

$$W_k = \frac{V^2}{2}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

де:  $V$  – миттєва швидкість з'єднання, м/с.

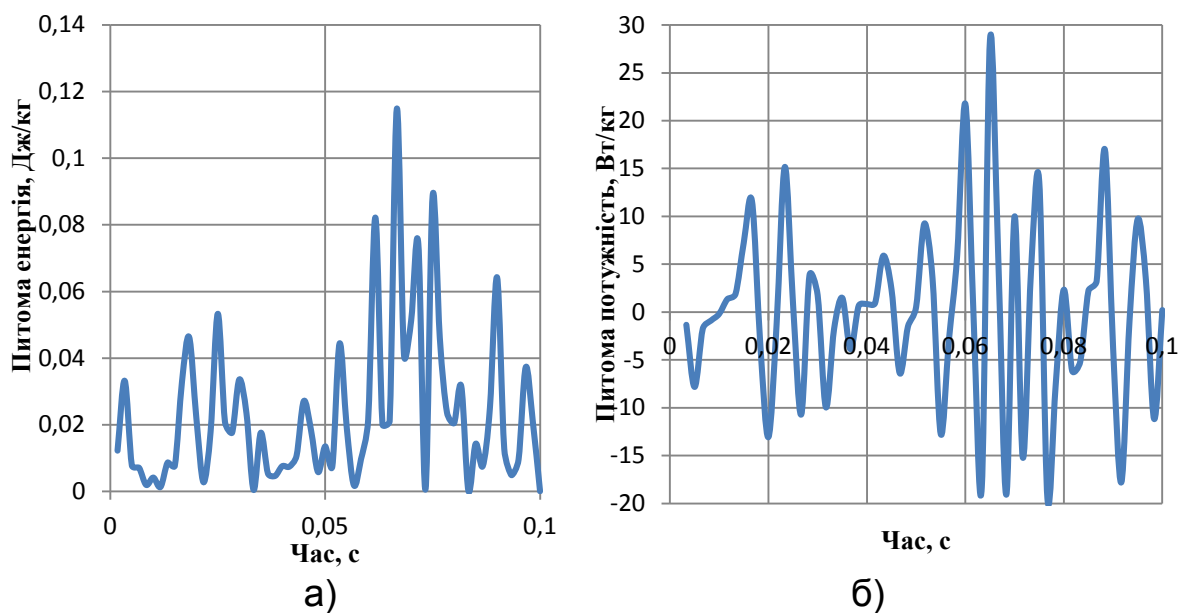


Рис. 9. Питома енергія вібрації (а) та питома потужність (б) синхронного з'єднання.

Енергетичний аспект коливань різьбового з'єднання з точки зору причин послаблення вивчався авторами Zhen Zhang, Menglong Liu, Zhongqing Su, Yi Xiao [9]. Розглянуто визначення послаблення з'єднання двома підходами: 1 – розсіювання енергії хвиль заснована на лінійному акустичному методі; 2 – віброакустична модуляція заснована на нелінійному методі.

Величина питомої потужності (Вт/кг) у випадку коливань у площині загвинчування-розгвинчування (ХУ) приймає, як додатні, так і від'ємні значення. Найбільший науково-технічний та практичний інтерес складає тренд потужності вібрації різьбового з'єднання. Зростання потужності може бути причиною зниження дисипативних параметрів системи через пошкодження контактуючих поверхонь, наявності залишкової деформації елементів з'єднання, виникнення

руйнувань. Збільшення вимушеної сили може бути наслідком підвищення дисбалансу рухомих деталей чи механізмів, нерівномірність технологічного навантаження на робочі органи. В ідеальних умовах дане явище взаємного кутового переміщення не викликати, а критичним станом при роботі таких з'єднань будуть беззаперечно резонансні режими та почергові косі послаблення опорної поверхні гайки у поєднанні із дією крутного моменту у бік розгвинчування. Це справедливе у випадку відносних коливань з'єднаних деталей, що характерно для не синхронних з'єднань. Допустима неперпендикулярність опорної поверхні та осьової лінії гайки, непаралельність поверхонь з'єднаних деталей у поєднанні із кутовими коливаннями сприятимуть взаємному кутовому мікропереміщенню гайки та різьбового стрижня.

### **Висновки**

1. В дослідженні бралась до уваги вібрація опорних поверхонь головки болта та гайки у взаємно перпендикулярних напрямках (у площинах, перпендикулярних до осі різьбового стрижня). Дана вібрація є результатом дії рухомих мас робочих органів, технологічного матеріалу та впливу явища дисипації. Вібрація є вимушеною і існує завдяки балансу енергії, що надходить до коливальної системи та енергії, затраченої на тертя.

2. На основі аналізу вібрації опорної поверхні головки болта і гайки введено поняття «синхронного» та «несинхронного» з'єднання. Числовий аналіз вібрації різьбового з'єднання сільськогосподарської техніки дозволяє судити про навантаженість різьбового з'єднання поперечною вимушеною силою та кутовими відносними коливаннями опорних поверхонь головки болта і гайки.

3. Дослідження актуальні для використання у симулятивному моделюванні даного процесу, яке дозволить прогнозувати ресурс різьбового з'єднання, планувати профілактичні дії та досягти максимальної відповідності необхідних параметрів різьбових з'єднань умовам роботи машини.

### **Список літератури**

1. *Рубець А. М.* Обґрунтування періодичності технічного обслуговування різьбових з'єднань зернозбиральних комбайнів. Автореферат дис. канд. тех. наук. Київ. 2009. 20 с.
2. *Михайлович Я. М., Рубець А. М.* Підвищення наробітку різьбових з'єднань сільськогосподарської техніки до послаблення. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2012. Вип. 170. Ч. 2. С. 178–185.
3. *Рубець А. М.* Робота болтового з'єднання сільськогосподарської техніки в умовах 3-D вібрації. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Дослідницьке. 2013. Вип. 17 (31). Кн. 1. С. 252–260.

4. *Рубець А. М.* Пружні коливання різьбового з'єднання в поперечному напрямку під дією двох збурюючих сил різної амплітуди, частоти та початкової фази. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Київ. 2009. Вип. 134. Ч. 2. С. 192–201.
5. *Михайлович Я. М., Рубець А. М.* Кінематичний аспект забезпечення працездатності різьбового з'єднання сільськогосподарські техніки. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2015. Вип. 226. С. 65–73.
6. *Рубець А. М.* Рух точок нейтральної лінії різьбового стрижня шпилькового з'єднання сільськогосподарської техніки під впливом поперечної вібрації. Техніка і технології АПК. 2014. № 2. С. 19–21.
7. *Шуваев И. В.* Повышение качества резьбовых соединений путем применения ультразвука. Автореферат дис. канд. тех. наук. Самара. 2009. 19 с.
8. *Kaminskaya V., Lipov A.* Self-loosening of bolted joints in machine tools during service. Metal Cutting Machine Tools. 12. 1990. P. 81–85.
9. *Zhen Zhang, Menglong Liu, Zhongqing Su, Yi Xiao.* Quantitative evaluation of residual torque of a loose bolt based on wave energy dissipation and vibro-acoustic modulation: A comparative study. Journal of Sound and Vibration. 383. 2016. P. 156–170.

## References

1. *Rubets, A. M.* (2009). Rationale for the frequency of maintenance of threaded connections combine harvesters. The author's abstract dis. cand. tech. sc. Kiev. 20.
2. *Myhaylovich, Ya. M., Rubets, A. M.* (2012). Rumen Increase the achievements of threaded connections agricultural machinery to weaken. Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: electronics and energetics, agriculture. Kiev. Vol. 170. Part 2. 178–185.
3. *Rubets, A. M.* (2013). Work bolting of agricultural machinery in the conditions of the 3-D vibration. Technical and technological aspects of the development and testing of new equipment and technologies for agriculture of Ukraine. Research. Vol. 17 (31). B. 1. 252–260.
4. *Rubets, A. M.* (2009). Elastic vibrations of a threaded connection in the transverse direction under the action of two disturbing forces of varying amplitude, frequency and initial phase. Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kiev. Vol. 134. Part 2. 192–201.
5. *Myhaylovich, Ya. M., Rubets, A. M.* (2015). Kinematic aspect of ensuring the health of the threaded connection of agricultural machinery. Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: electronics and energetics, agriculture. Kiev. Vol. 226. 65–73.
6. *Rubets, A. M.* (2014). Movement of points of neutral line of threaded rod connection of agricultural machinery under the influence of transverse vibration. Equipment and technologies of agroindustrial complex. No 2. 19–21.
7. *Shuvaev, S.* (2009). Improving the quality of threaded connections by applying ultrasound. The author's abstract dis. cand. tech. sc. Samara. 19.
8. *Kaminskaya, V., Lipov, A.* (1990). Self-loosening of bolted joints in machine tools during service. Metal Cutting Machine Tools. 12. 81–85.
9. *Zhen Zhang, Menglong Liu, Zhongqing Su, Yi Xiao.* (2016). Quantitative evaluation of residual torque of a loose bolt based on wave energy dissipation and vibro-acoustic modulation: A comparative study. Journal of Sound and Vibration. 383. 156–170.

## **АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

**Я. Н. Михайлович, А. Н. Рубец**

**Аннотация.** Предложен подход к изучению вопроса обеспечения необходимого технического ресурса болтового соединения на основе анализа вибрации головки болта и гайки. Полученную графическую зависимость энергии и мощности вибрации болтового соединения можно использовать для приведения в соответствие необходимых параметров резьбовых соединений условиям работы машин.

В исследовании принималось во внимание вибрация опорных поверхностей головки болта и гайки во взаимно перпендикулярных направлениях (в плоскостях, перпендикулярных к оси резьбового стержня). Данная вибрация является результатом действия движущихся масс рабочих органов, технологического материала и влияния явления диссипации. Вибрация является вынужденной и существует благодаря баланса энергии, поступающей к колебательной системы и энергии, затрачиваемой на трение.

На основе анализа вибрации опорной поверхности головки болта и гайки введено понятие «синхронного» и «несинхронного» соединения. Числовой анализ вибрации резьбового соединения сельскохозяйственной техники позволяет судить о загруженности резьбового соединения поперечной вынужденной силой и относительными угловыми колебаниями опорных поверхностей головки болта и гайки.

Исследования актуальны для использования в симулятивном моделировании данного процесса, которое позволит прогнозировать ресурс резьбового соединения, планировать профилактические действия и достичь максимального соответствия необходимых параметров резьбовых соединений условиям работы машины.

**Ключевые слова:** резьбовое соединение, сельскохозяйственная техника, кинематика

## **ANALYSIS OF KINEMATIC PARAMETERS OF BOLTED FASTENERS OF AGRICULTURAL MACHINERY**

**Ya. M. Mykhaylovych, A. M. Rubets**

**Abstract.** The approach to study the issue of providing the necessary service life of bolted fastener is proposed on basis of analysis of the vibration of the bolt head and nut. The resulting graphical dependence of the energy and the vibration power of the bolted fastener can be used to agree the necessary parameters of the threaded fastener to the working conditions of the machines.

*The study took into consideration the vibration of the bearing surfaces of the bolt head and the nut in mutually perpendicular directions (in planes perpendicular to the axis of the threaded rod). This vibration is the result of moving masses of working bodies of technological material and the influence of the phenomenon of dissipation. Vibration is a forced, and exists due to the balance of the energy supplied to the oscillating system and the energy spent on friction.*

*Based on the analysis of vibration bearing surface of the bolt head and nut introduced the concept of "synchronous" and "asynchronous" connection. Numerical analysis of vibration threaded connections agricultural machinery allows to judge about the functioning capacity of the threaded connection of the cross compelled by force and relative angular vibration of the bearing surfaces of the bolt head and nut.*

*Studies relevant for use in simulation modeling of this process, which will predict the resource threaded connections, plan preventive actions and to achieve maximum compliance with the required parameters of threaded connections, the working conditions of the machine.*

**Key words:** *threaded fasteners, vibration, kinematics, agricultural machinery*

УДК 621:664: 669.01(075)

## **ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ОТРИМАННЯ**

**Є. Г. Афтандіянц, доктор технічних наук**  
**ORCID iD-0000-0001-5864-9855**  
**Національний університет біоресурсів і**  
**природокористування України**  
**e-mail: [aftyev@hotmail.com](mailto:aftyev@hotmail.com)**

**Анотація.** *Актуальність проведення досліджень з вивченням закономірностей формування дисперсійнозміцнених структур монометалевих, біметалевих і композиційних матеріалів визначається необхідністю управління фізико-хімічними і теплофізичними процесами формування матеріалів, що працюють в умовах екстремальних навантажень і абразивного зношування. Метою дослідження є оптимізація складу, структури та технології виробництва таких перспективних матеріалів, як дисперсійнозміцнені азотом і ванадієм сталі, біметали та композити для забезпечення високої та стабільної якості*

© Є. Г. Афтандіянц, 2018