

УДК 693.542.52-868

**Басараб Володимир Аксенійович**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельного виробництва, [orcid.org/0000-0003-2888-7398](https://orcid.org/0000-0003-2888-7398)  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІЧАСТОТНОГО РЕЖИМУ КОЛИВАНЬ РОБОЧОГО ОРГАНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ УДАРНО-ВІБРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ**

***Анотація.** Досліджено взаємодію середовища (бетонної суміші) з робочим органом електромагнітної ударно-вібраційної установки для віброуцільнення будівельних сумішей. Розглянуто питання створення полічастотного режиму коливань робочого органу електромагнітної ударно-вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей. У результаті теоретичних досліджень визначено раціональний закон зміни жорсткості підвіски ударника в межах одного періоду коливань. Наведено графіки зміни параметрів системи під час дії функції керування. Запропоновано нову конструкцію підвіски ударника, що дає змогу реалізовувати полічастотний режим руху. Створено лабораторну модель двомасової електромагнітної ударно-вібраційної установки з магнітно-підвішеною конструкцією ударника.*

***Ключові слова:** полічастотний режим коливань; ударно-вібраційна установка; магнітно-підвішена конструкція ударника*

**Постановка проблеми**

Застосування ударно-вібраційних машин для ущільнення бетонних сумішей, що працюють на понижених частотах і реалізують складні режими взаємодії з середовищем (супергармонійний, поліфазний та ін.), доводить ефективність їхнього використання. Дослідження динаміки руху цих машин є достатньо ґрунтовними [2; 5]. Проте, нові технології ущільнення потребують реалізації складних режимів руху робочого органу за умов отримання виробів високої якості та мінімальних енерговитрат. Тому, актуальним є питання створення полічастотного режиму коливань робочого органу електромагнітної ударно-вібраційної установки та дослідження особливостей поведінки машини в умовах взаємодії з багатокомпонентним середовищем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Ефективності полічастотного впливу на бетонну суміш за умов віброуцільнення присвячено багато праць, серед яких слід відмітити роботи Г.Я. Кунноса, О.А. Савінова, Е.В. Лавриновича, В.Н. Шмигальського та ін. [1 – 8]. Практичне впровадження зазначеного впливу здебільшого зводиться до реалізації принципу суперпозиції, тобто поєднання в одній машині двох або більше різночастотних віброзбуджувачів. Теоретичних положень, що обґрунтовують створення та ефективне використання полічастотних режимів

віброуцільнення будівельних сумішей існує небагато. Також складність полягає в практичному створенні полічастотних, економічно та енергетично ефективних вібромашин.

**Виділення раніше невирішених задач**

Відомо, що процес ущільнення бетонної суміші з точки зору ефективності впливу різних параметрів вібрації є досить протирічним. Низькочастотний режим забезпечує добру проникливість енергії в товщу суміші, але не несе достатньої енергії для ефективного ущільнення багатокомпонентного середовища. На противагу цьому високочастотний режим є носієм енергії високої інтенсивності, але має низький ступінь проникливості і швидко поглинається середовищем. Тому, було прийнято рішення шукати розв'язання цієї задачі в раціональному поєднанні низькочастотних, тобто несучих, та високочастотних, тобто режимів, що накладаються, коливань робочого органу. Логічним підсумком вищенаведеного є необхідність створення вібромашини, яка дасть змогу реалізувати полічастотний характер руху робочого органу і цим самим забезпечити необхідний за технологією режим ущільнення. З теорії коливань відомо, що полічастотний, поліфазний та інші види вібраційних коливань можна створювати за допомогою принципу модуляції вібраційного сигналу [5; 9].

**Мета статті**

Мета роботи полягає в дослідженні закономірностей полічастотного руху робочого органу електромагнітної ударно-вібраційної

установки в умовах взаємодії з ущільнюваним середовищем при високій ефективності ущільнення та мінімальних енерговитратах.

### Виклад основного матеріалу

У результаті проведення експериментальних досліджень, встановлено [3], що спектр напружень середовища в зоні контакту “форма-суміш” під час ущільнення зміщується в напрямку високих частот. Результати експериментальних досліджень доводять необхідність створення полічастотного режиму руху робочого органу віброна машини.

Відомо [2], що зміною жорсткості підвіски ударника  $C_1$  та часом затримки на вмикання живлення електромагнітів  $t_z$  можна керувати параметрами роботи машини для забезпечення необхідного за технологією змінного режиму ущільнення, проте зміна параметрів в даній роботі відбувається за весь цикл ущільнення і не забезпечує полічастотного режиму коливань робочого органу.

Для створення полічастотного режиму коливань найбільш “зручним” параметром динамічної системи є жорсткість ресори  $C_1$ , проте змінювати жорсткість механічної системи з частотою, що перевищує основну частоту роботи машини не є ефективним і потребує додаткових витрат енергії. Тому, було прийнято рішення замінити механічну ресору електромагнітним підвищенням ударника.

В режимі комп’ютерного моделювання в середовищі MathCAD було проведено дослідження зміни параметрів роботи машини за умов зміни жорсткості ресори в міжударний період [5]. За результатами моделювання отримано стійкий полічастотний характер руху робочого органу.

Динамічним параметром, що найсуттєвіше впливає на напружено-деформований стан середовища, є прискорення елементарних шарів суміші. Тому умовним критерієм оцінки якості процесу приймаємо прискорення робочого органу.

Очевидно, що знайти оптимальний режим руху, врахувавши всі технологічні параметри, не є можливим на даному етапі. Задавши необхідні обмеження, знайдемо оптимальний закон зміни жорсткості ресори  $C_2=f(t)$ . Далі слід задати критерій оптимізації. Якщо основним параметром, закон руху якого ми хочемо отримати згідно вищевказаних умов, є прискорення робочого органу, тоді необхідно мінімізувати динамічні навантаження, що виникають в електромеханічній системі в результаті генерації вищих гармонічних складових.

Запишемо інтегральний функціонал, використовуючи енергію прискорень по Апелю [6]:

$$I_v = \int_0^{t_1} V dt, \quad (1)$$

де  $V = \frac{m_1 \ddot{X}_1^2}{2}$  – енергія прискорень робочого органу віброна машини.

Для визначення оптимального закону руху робочого органу необхідно мінімізувати інтегральний функціонал (1).

Умовою мінімуму функціоналу (1) є рівняння Ейлера-Лагранжа [6]:

$$\frac{\partial F}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_k} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial F}{\partial \ddot{q}_k} = 0, \quad (k = 1, 2, \dots, s), \quad (2)$$

де  $F$  – міра руху або дії механічної системи;  $q_k$  – узагальнені координати системи.

В нашому випадку в якості функції  $F$  буде енергія прискорень робочого органу віброна машини. Замість узагальненої координати беремо переміщення робочого органу  $X_1$ . Після підстановки зазначених замін у вираз (2) отримаємо рівняння четвертого порядку

$$X^{IV} = 0. \quad (3)$$

Розв’язок рівняння (3) будемо здійснювати чисельним методом.

На графіках (рис. 1, а) наведено параметри системи (переміщення, швидкість, прискорення) під час дії функції керування  $C_1 = f(t)$ .

Для проведення критеріального аналізу в якості функції керування пружністю підвіски застосовано трикутний (пилкоподібний), прямокутний та закон синуса (рис. 1, б). Моделювання проводилось за таких початкових умов: вантажопідйомність віброблока 100 кг, жорсткість  $C_1 = 80000 \dots 480000$  Н/м, час затримки  $t_z = 0,03 \dots 0,04$  с.

Запишемо співвідношення для сили тяги електромагніта:

$$\begin{aligned} \frac{dF_e}{dx} &= \frac{d}{dx} \int_0^{\psi} i \cdot d\psi; \\ F_e &= -\frac{ab\psi_p^2}{2(b+x)^2}; \\ \frac{dF_e}{dx} &= \frac{ab\psi_p^2}{(b+x)^3}. \end{aligned} \quad (4)$$

За результатами розв’язку рівняння (3) побудовано графік (рис. 2).

Побудувавши графік залежності похідної сили тяги електромагніта, взятої по координаті  $x$  від відносного переміщення мас (рис. 3) та порівнявши з графіком зміни жорсткості підвіски в часі за критерієм Ейлера – Лагранжа (рис. 2), можна зробити висновок: функція керування повинна бути подібна до функції вимушуючої сили.

Це логічно, оскільки динамічні параметри системи змінюються за законом вимушуючої сили.

Якщо технічно здійснювати пружне підвішування за допомогою електромагніту, тоді стає очевидним, що функція, яку “найпростіше” реалізувати, буде саме закон зміни тяги електромагніта.

Раціональні частоти функції керування пружністю підвіски ударника за результатами Фур’є аналізу експериментальних даних:

$$\omega_1 = 62,8 \text{ рад/с}, \quad \omega_2 = 125,66 \text{ рад/с},$$

$$\omega_4 = 251,33 \text{ рад/с}, \quad \omega_5 = 314,16 \text{ рад/с}.$$

Графік раціонального закону зміни жорсткості ресори можна представити у вигляді поліноміального ряду розбитого на дві частини:

$$C_{1(1)} = -1,0474t^5 + 41,141t^4 - 521,56t^3 + 3251,3t^2 - 8257,3t + 286124; \quad (5)$$

$$C_{1(2)} = -19,444t^3 + 1458,3t^2 - 34310t + 587267.$$

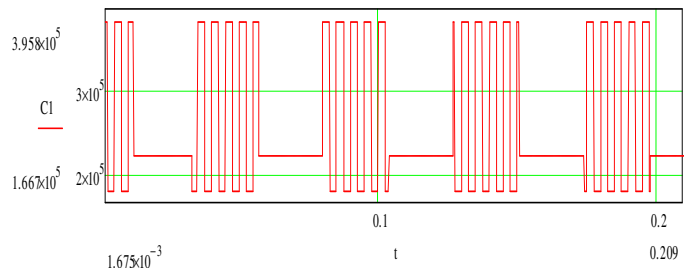
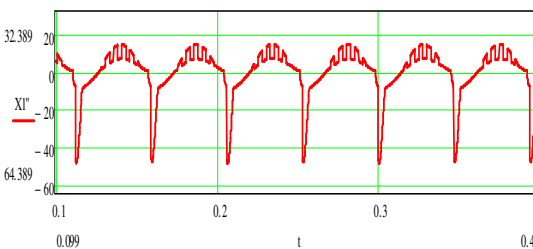
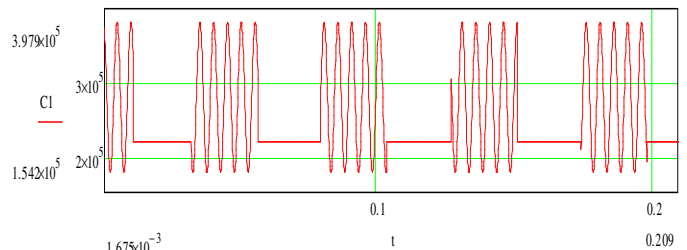
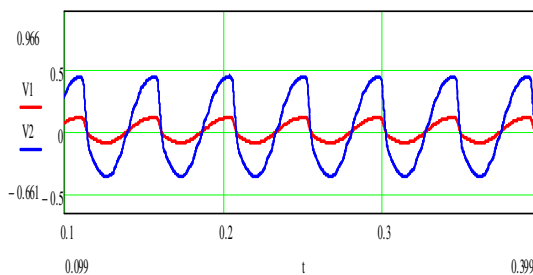
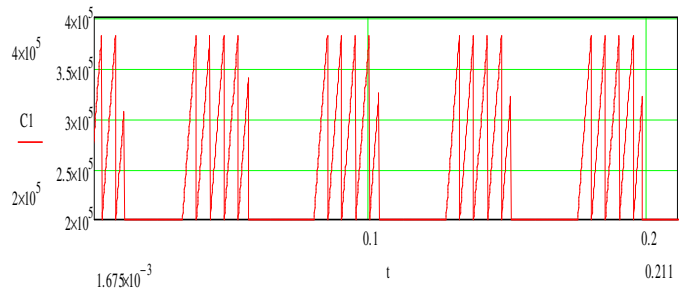
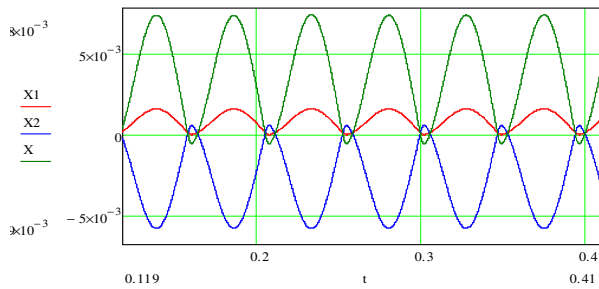


Рисунок 1 – Графіки зміни параметрів системи за умови керуючої дії  $C_1=f(t)$ :  
а- графіки основних параметрів системи; б- графіки зміни жорсткості ресори

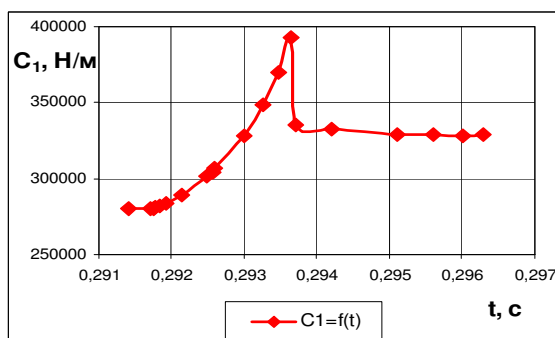


Рисунок 2 – Графік зміни жорсткості ресори в часі за критерієм Ейлера-Лагранжа

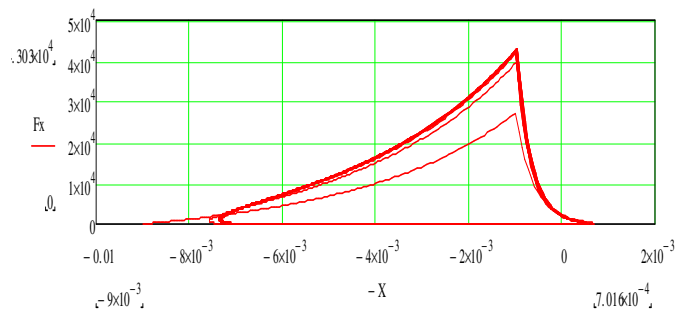


Рисунок 3 – Графік залежності сили тяги електромагніта від зазору в магнітопроводі

Наступним етапом досліджень була розробка нової конструкції машини.

Поставлена задача вирішується шляхом вдосконалення наявної машини за рахунок встановлення електромагнітного підвішування ударника (рис. 4).

Для ефективної роботи віброустановки розроблена схема керування, що побудована на базі сучасного програмованого контролера PIC 16C47.

Застосування схеми управління дає можливість програмно керувати роботою вібромашини відповідно до технологічних вимог [5].

Для перевірки працездатності системи створено лабораторну модель двомасової електромагнітної ударно-вібраційної установки (рис. 5). Установка складається з робочого органу, ударника, що підвішений на постійних магнітах, опорної рами, гумових опор, електромагніта приводу та апаратури керування. Проведені випробування підтверджують доцільність використання магнітного підвішування ударника, що є темою подальших досліджень.

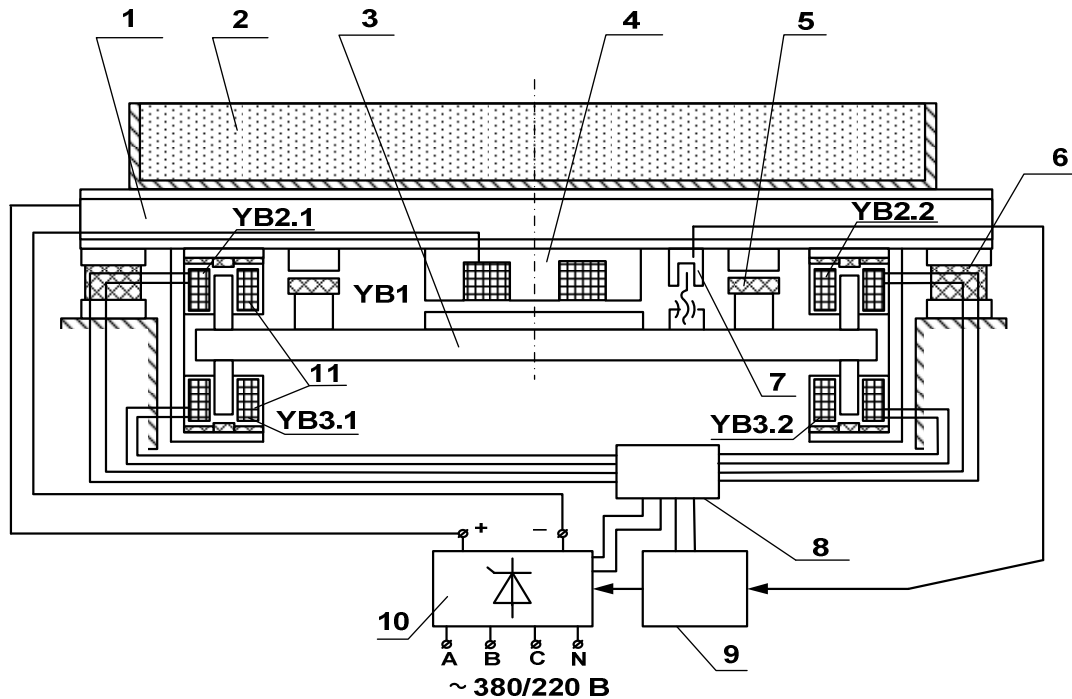


Рисунок 4 – Електромагнітна ударно-вібраційна установка для формування бетонних виробів:  
 1 – робочий орган; 2 – форма з сумішшю; 3 – ударник; 4 – основний електромагніт (YB1); 5 – буферні елементи;  
 6 – опорні амортизатори; 7 – індукційний датчик; 8 – програмований мікроконтролер; 9 – блок керування;  
 10 – тиристорний випрямляч; 11 – соленоїд підресорювання



Рисунок 5 – Лабораторна двомасова електромагнітна ударно-вібраційна установка зі зміненою конструкцією підвіски ударника

### Висновки

1. За результатами теоретичних досліджень отримано стійкий полічастотний рух робочого органу.

2. Знайдено раціональний закон зміни жорсткості підвіски ударника в межах одного періоду коливань.

3. Запропонована нова конструкція підвіски ударника, що дає змогу реалізувати полічастотний режим руху.

4. Створено лабораторну модель двомасової електромагнітної ударно-вібраційної установки з магнітно-підвішаною конструкцією ударника.

### Список літератури

1. Афанасьев А.А. *Технология импульсного уплотнения бетонных смесей* / А.А. Афанасьев. – М.: Стройиздат, 1987. – 166 с.
2. Баранов Ю.А. Особенности проектирования ударно-вибрационных площадок с электромагнитным приводом / Ю.А. Баранов // *Горные, строительные, дорожные и мелиоративные машины. Респуб. межвед. науч.-технич. сборник*. – К.: Техника, 1990. – Вып. 43. – С. 69 – 72.
3. Баранов Ю.О. Методика экспериментальных исследований взаимодействия середовища з робочим органом ударно-вібраційної площадки / Ю.О. Баранов, М.О. Клименко, В.А. Басараб // *Техніка будівництва*. – К.: КНУБА, 2002. – №11. – С. 24 – 28.
4. Гусев Б.В. Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных смесей / Б.В. Гусев, А.Д. Деминов, Б.И. Крюков и др. – М.: Стройиздат, 1982. – 150 с.
5. Дж. Ден-Гартог. *Механические колебания* / Дж. Ден-Гартог. – М.: Физматгиз, 1960. – 580 с.
6. Кравченко І.М. Керування динамічними параметрами електромагнітної ударно-вібраційної системи / І.М. Кравченко, В.А. Басараб // *Техніка будівництва*. – К.: КНУБА, 2006. – №19. – С. 56-63.
7. Ловейкин В.С. *Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин* / В.С. Ловейкин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168 с.
8. Маслов А.Г. *Определение параметров поличастотной виброплощадки для формования железобетонных изделий* / А.Г. Маслов // *Горные, строительные и дорожные машины*. – Киев: Техника, 1984. – № 37. – С. 107–113.
9. Овчинников П.Ф. *Уплотнение строительных смесей на переменных во времени параметрах вибрации и удара* / П.Ф. Овчинников, В.С. Бабий. – Кишинев: Штиинца, 1976. – 134 с.
10. *Радиотехника: энциклопедичний навчальний довідник: Навч. посіб.* / За ред. Ю.Л. Мазора, Є.А. Мачуського, В.І. Правди. – К.: Вища школа, 1999. – 838 с.

Стаття надійшла до редколегії 13.04.2018

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.І. Мазуренко, Інститут електродинаміки НАН України, Київ.

#### Басараб Владимир Аксениевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства, [orcid.org/0000-0003-2888-7398](https://orcid.org/0000-0003-2888-7398)  
Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИЧАСТОТНОГО РЕЖИМА КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УДАРНО-ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

**Аннотация.** Исследовано взаимодействие среды (бетонной смеси) с рабочим органом электромагнитной ударно-вибрационной установки для виброуплотнения строительных смесей. Рассмотрен вопрос создания поличастотного режима колебаний рабочего органа электромагнитной ударно-вибрационной установки для уплотнения бетонных смесей. Определен рациональный закон изменения жесткости подвески ударника в пределах одного периода колебаний. Приведены графики изменения параметров системы при действии функции управления. Предложена новая конструкция подвески ударника, которая дает возможность реализовывать поличастотный режим движения. Разработана лабораторная модель двухмассовой электромагнитной ударно-вибрационной установки с магнитно-подвешенной конструкцией ударника.

**Ключевые слова:** поличастотный режим колебаний; ударно-вибрационная установка; магнитно-подвешенная конструкция ударник

**Basarab Volodymyr**

PhD (Eng.), associate Professor of Department of technology of building production, *orcid.org/0000-0003-2888-7398*  
Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv

#### INVESTIGATION OF THE POLYFREQUENCY MODE OF OSCILLATION OF THE ELECTROMAGNETIC SHOCK-VIBRATION UNIT

**Abstract.** The article presents a modern investigation of the problem of interaction between concrete mix and working platform electromagnetic shock – vibration setting under conditions of vibro-compacting. The problem to create poliharmonic vibration conditions of work platform electromagnetic vibroimpact machine for concrete compression was described. Rational mathematic equation of suspended impactor springiness within one period of oscillation was determined as a result of theoretical investigation. The graphs of the system parameters change during the operation of the control function are shown. The new suspended impactor design which gives a possibility to realize poliharmonic vibration conditions was proposed. The laboratory model two-mass electromagnetic shock-vibration machine with magnetically suspended construction of impactor was created.

**Key words:** poliharmonic vibration conditions; shock-vibration machine; magnetically suspended construction of impactor

#### References

1. Afanasev, A.A. (1987). *Technology of impact compaction of concrete mixtures*, Construction publishing house, Moscow.
2. Baranov, Iu.A. (1990). Particular qualities of designing shock-vibration sets with electromagnetic drive. *Mountain, construction, road and reclamation machines*, (43), 69 – 72.
3. Baranov, Iu.O., Klymenko, M.O., & Basarab, V.A., (2002). The methodology of experimental researches interaction between concrete mix and working shock – vibration platform. *Construction engineering*, 11, 24 – 28.
4. Husev, B.V., Demynov, A.D., Kriukov, B.Y. and others. (1982). *Shock-vibration technology for compacting concrete mixes*, Construction publishing, Moscow.
5. Den-Hartoh, Dzh. (1960). *Mechanical oscillations*, Physics-mathematical publishing house, Moscow.
6. Kravchenko, I.M. & Basarab, V.A. (2006). Control of dynamic parameters of the electromagnetic shock-vibration system. *Construction engineering*, 19, 56 – 63.
7. Loveikyn, V.S. (1990). *Calculations of optimal movement modes of construction machines mechanisms*. University publishing. Kyiv.
8. Maslov, A.H. (1984). Determination of the parameters of a polyfrequency vibratory platform for forming reinforced concrete products. *Mountain, construction, road and reclamation machines*, 37, 107 – 113.
9. Ovchynnykov, P.F. & Babyi, V.S. (1976). *Compaction of construction mixtures at time-variable vibration and impact parameters*. Kishinev.
10. Mazor, Iu.L., Machuskij, Ie.A., & Pravda, V.I. (1999). *Radioengineering: an encyclopedic study guide*, High school, Kyiv.

---

#### Посилання на публікацію

- APA Basarab, Vladimir. (2018). *Investigation of the polyfrequency mode of oscillation of the electromagnetic shock-vibration unit*. *Management of Development of Complex Systems*, 34, 182 – 187.
- ДСТУ Басараб В.А. Дослідження полічастотного режиму коливань робочого органу електромагнітної ударно-вібраційної установки [Текст] / В.А. Басараб // *Управління розвитком складних систем*. – 2018. – № 34. – С. 182 – 187.