

## АНОТАЦІЯ

*Качур Олександр Юрійович.* Обґрунтування параметрів дискретно-континуальних міжрезонансних вібраційних машин з керованим кривошипно-шатунним приводом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 131 – “Прикладна механіка”. Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти та науки України, Львів – 2021.

У вступі встановлено, що незважаючи на наявність широкої гами конструкцій вібраційних машин (в основному одно- та двомасових), які повністю задовольняють потреби промисловості, сучасні тенденції енергозбереження вимагають пошуку нових рішень у створенні високоефективного вібраційного технологічного обладнання. Найбільш перспективними для подальших досліджень є дискретні тримасові міжрезонансні вібраційні машини. Проте, під час реалізації високоефективних міжрезонансних режимів роботи існують труднощі з приведенням в рух надлегких реактивних мас. Формується усвідомлення того, що дискретні структури тримасових міжрезонансних механічних коливальних систем вичерпали свій потенціал, оскільки існуючі методики їх розрахунку не в стані забезпечити стійку зону коливань для надлегких реактивних мас.

Тож пошук нових структур і підходів у розрахунку міжрезонансних вібраційних машин, приводи яких здатні безперешкодно входити в міжрезонансну зону та приводити в рух надлегкі реактивні маси, реалізуючи дієві високоефективні конструкції, є однією з перспективних науково-прикладних задач машинобудування, для вирішення якої сформовано мету та завдання подальших дисертаційних досліджень.

З метою пошуку шляхів вирішення поставленої науково-прикладної задачі було проведено літературний огляд сучасного стану та напрямків удосконалення вібраційних машин. Вкотре було доведено, що одно- та двомасові коливальні системи нездатні реалізовувати високоефективні режими роботи, притаманні міжрезонансним. Тому їх подальший аналіз виявився неперспективним.

Підтверджено, що тримасовим механічним коливальним системам властиві високі коефіцієнти динамічності і вони, без сумніву, є енергоощадні. Проте, широке їх поширення дійсно обмежується низкою чинників. Так, в системах з електромагнітним проводом невирішені до кінця задачі стабілізації амплітуди коливань надмалої реактивної маси, яка в міжрезонансних режимах може набувати критичних значень, нівелюючи умови міцності пружних елементів. В системах з дебалансним приводом існують труднощі безпроблемного входження у міжрезонансну зону, коли оберти дебаланса можуть “зависнути” на першому власному резонансному піку (не розглядаючи резонансний пік, сформований дією віброізоляторів).

Виявлено, що тримасові міжрезонансні коливальні системи вичерпали свій потенціал, оскільки існуючі методики їх розрахунку не в стані забезпечити стійку зону коливань для надлегких реактивних мас, амплітудно-частотні характеристики яких стрімкоподібні. Тож одним з шляхів по вдосконаленню міжрезонансних вібраційних машин є пошук підходів у синтезі нових структур, на основі яких можна буде розробити дієве високоефективне вібраційне обладнання.

Відзначено, що у високоефективних міжрезонансних системах реактивна маса та жорсткість відповідного пружного вузла повинні бути відповідно надлегкими та надмалими. Такими властивостями може володіти гнучке тіло (тіло з розподіленими параметрами), тобто континуальна ділянка, яка оптимально поєднує у собі інерційні та жорсткісні параметри.

На основі результатів літературного огляду була сформульована ідея, покликана розв’язати поставлену науково-прикладну задачу. Вона полягає у поєднанні дискретних та континуальних коливальних систем, синергія яких в гібридних структурах здатна надати вібраційним машинам нових властивостей по ефективності функціонування. Гіпотеза, яка забезпечує виконання даної ідеї, звелась до введення в дискретну коливальну систему тіла з розподіленими параметрами (континуальної ділянки у вигляді стержня, пластини тощо), яке одночасно наділене надлегкими інерційними та надмалими жорсткісними пара-

метрами. Результати дисертаційних досліджень, як виявилось, повністю підтвердили правильність закладених ідеї та гіпотези. Їх реалізація забезпечила якісний розвиток енергоощадних міжрезонансних вібраційних машин, які ефективно забезпечують високоефективні режими роботи, реалізуючи вузьку міжрезонансну зону з надвисокими коефіцієнтами динамічності.

З огляду на це акцент роботи був поставлений на розробленні структурної схеми механічної коливальної системи вібраційної машини з континуальною ділянкою (тілом з розподіленими параметрами, найбільш ймовірно стержнем), встановленні її параметрів, дослідженні її властивостей та поєднання її з дискретною моделлю. У результаті досліджень виявлено, що найбільш придатним об'єктом для реалізації континуальної ділянки є стержень, який володіє достатньою гнучкістю (малою жорсткістю) та незначними інерційними параметрами. Стержні здатні розвивати значні амплітуди коливань, забезпечуючи умови міцності, що є цінним під час реалізації вузла реактивної маси. Обґрунтовано, що найбільш доцільно приводити в рух дискретно-континуальну систему кривошипно-шатунним механізмом.

Оскільки ключовим елементом гібридної структури механічної коливальної системи стала континуальна ділянка у вигляді стержня, окремим розділом сформована методологія його досліджень, яка є необхідним матеріалом для встановлення базових аналітичних залежностей, надає розуміння фізики процесу його коливань та формує методологічне підґрунтя подальшим дисертаційним дослідженням. Так, розглянуто диференціальне рівняння зігнутої осі стержня, з якого отримано відомі аналітичні залежності згинального моменту та поперечної сили, необхідні для встановлення його поперечних прогинів. Розглянуто методику формування диференціального рівняння згинальних коливань стержня, яка дозволяє описати його вимушений рух та визначити його власні частоти коливань. Окреслено метод Релея-Рітца, який дозволяє наближено визначити власну частоту стержня, встановити його зведені масу і жорсткість, які задіяні в коливальному процесі. Запропонована методика пошуку зведеної швидкості стержня

– точки, в яку власне і зводяться його інерційно-жорсткісні параметри. Проаналізовано методологію встановлення параметрів дискретної тримасової міжрезонансної коливальної системи, як еталонної для аналізу дискретно-континуальної.

Як початковий етап у синтезі дискретно-континуальної міжрезонансної вібраційної машини обґрунтовано інерційно-жорсткісні та силові параметри високоефективної дискретної тримасової міжрезонансної коливальної системи вібраційного транспортера-сепаратора – як еталонної моделі, параметри якої приймаються визначальними для формування дискретно-континуальної системи і повинні бути реалізовані в ній. Встановлено основні технологічні та конструктивні параметри еталонної системи, а саме: обґрунтовано доцільність використання низькочастотних режимів роботи; визначено інерційні параметри активної та проміжної коливальних мас; з метою забезпечення необхідного додаткового динамічного підсилення коливань вибрано розташування власних резонансних піків; встановлено інерційне значення реактивної маси та жорсткостей двох резонансних пружних вузлів. Власне інерційне значення реактивної маси та жорсткість відповідного їй пружного вузла поєднуються у континуальній ділянці вібраційної машини (стержні) і є ключовими під час її реалізації. Розглянута математична модель еталонної дискретної коливальної системи, проаналізовано її амплітудно-частотні характеристики та перехідні режими роботи. Встановлено ефективність функціонування еталонної тримасової дискретної системи порівняно з адекватною двомасовою резонансною. Визначено парціальну частоту коливань реактивної маси, яка є визначальною під час підбору континуальної ділянки (стержня).

Як найбільш раціональною схемою для реалізації континуальної ділянки високоефективної міжрезонансної вібраційної машини вибрано тіло з розподіленими параметрами у вигляді стержня, що встановлений на двох шарнірних опорах, один з кінців якого консольно закріплений, а другий приводиться в рух від ексцентрика. Власне наявність консолі, коливальний рух якої необмежується

нічим, як виявиться далі, забезпечить можливість накопичення необхідних інерційних сил в реактивному вузлі (континуальній ділянці), так необхідних для приведення в рух усієї механічної коливальної системи.

Розглянуто вільні згинальні коливання континуальної ділянки з використанням функцій Крилова і встановлено її першу власну частоту коливань, яка практично повністю збігається з відповідною парціальною частотою еталонної дискретної моделі. Розглянуто вимушені коливання континуальної ділянки та сформовано на основі колових та гіперболічних функцій Крилова математичну модель у вигляді системи рівнянь, що описує її рух. Виділивши частотну матрицю, вкотре підтверджено значення першої власної частоти коливань континуальної ділянки. Сформовано математичну модель дискретно-континуальної коливальної системи вібраційної машини, в якій через реакції в опорах континуальної ділянки поєднано дискретну частину системи з континуальною. Визначено значення постійних параметрів та реакцій в опорах. Побудовано амплітудно-частотну характеристику дискретно-континуальної коливальної системи, яка повністю узгодилась із характеристикою еталонної дискретної тримасової. Це дозволило стверджувати про наявність у синтезованій структурі параметрів та властивостей еталонної дискретної системи. Побудовано схему прогинів континуальної ділянки, розраховано її на міцність. Власну частоту коливань перевірено наближеним методом Релея-Рітца. З використанням цього ж методу встановлено зведену масу та зведену жорсткість континуальної ділянки, які практично повністю узгодилися із розрахунковими значеннями.

Конструкторсько-експериментальна частина дисертації присвячена остаточному формуванню та дослідженню дискретно-континуальної міжрезонансної вібраційної машини. Значна увага приділена створенню керованого кривошипно-шатунного привода, який відрізняється від існуючих вібробуджувачів можливістю в широкому діапазоні змінювати величину ексцентриситету та плавно керувати частотою збурення. Перераховані переваги забезпечують безперешкодне входження обертів кривошипа у міжрезонансну зону, обходячи

ефект Зоммерфельда; спрощують процес регулювання режимів роботи вібраційного обладнання відповідно до змінних технологічних або виробничих умов. Обґрунтовано конструктивні та експлуатаційні параметри запропонованого керованого кривошипно-шатунного механізму. За допомогою методу замкнених векторних контурів описано кінематику механізму, на основі чого отримано аналітичні вирази, які описують залежність зміни ексцентриситету від переміщення керованого повзуна. Побудовано відповідні графіки. Правильність отриманих виразів та результатів чисельного моделювання було підтверджено імітаційним моделювання руху механізму. Опіраючись на проведений аналіз механізму, розроблено керований кривошипно-шатунний привод і реалізовано його у вібраційному транспортері-сепараторі.

Розроблено схему розміщення та кріплення пружних елементів, що з'єднують між собою активну та проміжну маси вібраційного транспортера-сепаратора. Проведено аналітичні розрахунки їх жорсткісних параметрів, які узгодились з дискретною математичною моделлю. Встановлено геометричні параметри пружних елементів та аналітично розраховано напруження, що виникають в них. Проведено комп'ютерне моделювання пружного елемента методом скінченних елементів. Це дозволило перевірити результати аналітичних обчислень жорсткості та максимальних напружень, які виникають у ньому.

Виходячи з умови мінімізації передачі динамічних навантажень на фундамент була вибрана необхідна частота власних коливань системи на віброізоляторах, на основі чого проведено їх розрахунок на жорсткість та міцність. Достовірність отриманих результатів було підтверджено комп'ютерним моделюванням методом скінченних елементів. Це завершило конструкторську частину й надало всі вихідні дані для створення експериментального зразка дискретно-континуального міжрезонансного вібраційного транспортера-сепаратора.

Експериментально встановлено парціальну частоту коливань континуальної ділянки, що дозволило опосередковано підтвердити наявність в ній інерційно-жорсткісних параметрів, закладених під час розрахунку. На основі знятих

часових залежностей руху активної та проміжної мас, експериментально підтверджено наявність закладених розрахункових амплітудно-частотних характеристик, що загалом вказало на правильність розробленої методології дисертаційних досліджень. Експериментально підтверджено безперешкодний вхід у міжрезонансну зону керованого кривошипно-шатунного привода, що дозволило стверджувати про обґрунтованість використання запропонованих структур під час створення високоефективних міжрезонансних вібраційних машин.

На основі конструкторської частини була сформована методологія побудови дискретно-континуального міжрезонансного вібраційного транспортерасепаратора, де вперше застосовано гібридні (дискретно-континуальні) структури коливальних систем, відмінністю яких є введення у якості третьої (реактивної) маси континуальної ділянки, наділеної на першій власній частоті певною зведеною жорсткістю та зведеною масою. Це дозволило ефективно забезпечувати міжрезонансні режими роботи, розкривши прихований потенціал синтезованих систем, обумовлений синергією дискретної та континуальної коливальних систем.

**Ключові слова:** дискретно-континуальна механічна коливальна система, вібраційна машина, міжрезонансний режим роботи, власна частота коливань.

## ABSTRACT

*Kachur Oleksandr Yuriyovych.* Synthesis of energy-efficient discrete-continuous inter-resonance vibratory machines with controllable crank drive – Qualifying scientific hearing on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy (PhD) on a specialty 131 – Applied mechanics. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv – 2021.

In the introduction it is established that despite the presence of a wide range of designs of vibrating machines (mostly single- and two-mass), which fully meet the needs of industry, modern energy conservation trends require finding new solutions in

creating highly efficient vibrating technology equipment. The most promising for further research are discrete three-mass inter-resonant vibrating machines. However, during the implementation of highly efficient inter-resonant modes of operation there are difficulties with the propulsion of ultralight reactive masses. There is an awareness that discrete structures of three-mass inter-resonant mechanical oscillatory systems have exhausted their potential, because the existing methods of their calculation are not able to provide a stable oscillation zone for ultralight reactive masses.

Therefore, the search for new structures and approaches in the calculation of inter-resonant vibrating machines, the drives of which are able to freely enter the inter-resonant zone and drive ultralight reactive masses, implementing effective high-performance structures, is one of the promising scientific and applied problems of mechanical engineering. further dissertation research.

In order to find ways to solve the scientific and applied problem, a literature review of the current state and areas of improvement of vibrating machines was conducted. It has been proved once again that single- and two-mass oscillating systems are incapable of realizing the highly efficient modes of operation inherent in interresonance. Therefore, their further analysis was not promising.

It is confirmed that three-mass mechanical oscillating systems are characterized by high coefficients of dynamism and they are, without a doubt, energy-saving. However, their wide distribution is really limited by a number of factors. Thus, in systems with electromagnetic wire, the problem of stabilizing the amplitude of oscillations of ultrasmall reactive mass, which in inter-resonant modes can acquire critical values, leveling the strength conditions of elastic elements, is unsolved. In systems with unbalanced drive, there are difficulties of trouble-free entry into the inter-resonance zone, when the speed of the unbalance can "hang" on the first own resonant peak (without considering the resonant peak formed by the action of vibration isolators).

It was found that three-mass inter-resonant oscillatory systems have exhausted their potential, because the existing methods of their calculation are not able to provide a stable oscillation zone for ultralight reactive masses, the amplitude-frequency



characteristics of which are rapid. Therefore, one of the ways to improve inter-resonant vibration machines is to find approaches in the synthesis of new structures, based on which it will be possible to develop effective high-performance vibration equipment.

It is noted that in highly efficient inter-resonant systems, the reactive mass and stiffness of the corresponding elastic node should be ultralight and ultrasmall, respectively. Such properties may have a flexible body (a body with distributed parameters), ie a continuous section that optimally combines inertial and rigid parameters.

Based on the results of the literature review, an idea was formulated to solve the scientific and applied problem. It consists in a combination of discrete and continuous oscillatory systems, the synergy of which in hybrid structures is able to give vibrating machines new properties in terms of efficiency. The hypothesis that ensures the implementation of this idea was reduced to the introduction into a discrete oscillatory system of a body with distributed parameters (a continuous section in the form of a rod, plate, etc.), which is simultaneously endowed with ultralight inertial and ultra small stiffness parameters. The results of dissertation research, as it turned out, fully confirmed the correctness of the ideas and hypotheses. Their implementation has ensured the high-quality development of energy-saving inter-resonant vibration machines, which effectively provide highly efficient modes of operation, implementing a narrow inter-resonance zone with ultra-high coefficients of dynamism.

With this in mind, the emphasis was on developing a block diagram of a mechanical oscillating system of a vibrating machine with a continuous section (a body with distributed parameters, most likely a rod), establishing its parameters, studying its properties and combining it with a discrete model. Studies have shown that the most suitable object for the implementation of the continuum is a rod that has sufficient flexibility (low rigidity) and low inertial parameters. The rods are able to develop significant amplitudes of oscillations, providing strength conditions that are valuable during the implementation of the node of the reactive mass. It is substantiated that it is most expedient to set in motion a discrete-continuum system by a crank mechanism.

Since the key element of the hybrid structure of the mechanical oscillatory system was a continuous section in the form of a rod, a separate section formed the methodology of its research, which is a necessary material for establishing basic analytical relationships, provides understanding of the physics of its oscillations and forms the methodological basis for further dissertation research. Thus, the differential equation of the bent axis of the rod is considered, from which the known analytical dependences of the bending moment and the transverse force required to establish its transverse deflections are obtained. The method of forming the differential equation of bending oscillations of the rod is considered, which allows to describe its forced motion and to determine its natural frequencies of oscillations. The Rayleigh-Ritz method is outlined, which allows to approximate the natural frequency of the rod, to establish its reduced mass and stiffness, which are involved in the oscillatory process. A method for finding the consolidated velocity of the rod - the point at which its inertial-stiffness parameters are actually reduced - is proposed. The methodology of establishing the parameters of a discrete three-mass inter-resonant oscillatory system as a reference for the analysis of a discrete-continuum is analyzed.

As an initial stage in the synthesis of discrete-continuum inter-resonant vibrating machine, inertial-rigid and force parameters of high-efficiency discrete three-mass inter-resonant oscillatory vibration conveyor-separator system are substantiated as a reference model, the parameters of which are determined to form discrete-continuum systems. The basic technological and constructive parameters of the reference system are established, namely: expediency of use of low-frequency operating modes is substantiated; the inertial parameters of the active and intermediate oscillating masses are determined; in order to provide the necessary additional dynamic amplification of oscillations, the location of its own resonant peaks is chosen; the inertial value of the reactive mass and stiffness of two resonant elastic nodes is established. The actual inertial value of the reactive mass and the stiffness of the corresponding elastic node are combined in the continuous section of the vibrating machine (rods) and are key during its implementation. The mathematical model of the reference discrete oscillatory system is considered, its amplitude-frequency characteristics and transient

modes of operation are analyzed. The efficiency of functioning of the reference three-mass discrete system in comparison with the adequate two-mass resonance one is established. The partial frequency of oscillations of the reactive mass is determined, which is decisive during the selection of the continuum section (rod).

A body with distributed parameters in the form of a rod mounted on two hinged supports, one of the ends of which is cantilevered, and the other is driven by an eccentric, is chosen as the most rational scheme for the implementation of the continuum section of a high-efficiency inter-resonant vibrating machine. In fact, the presence of a console, the oscillating motion of which is not limited by anything, as it turns out, will provide the possibility of accumulation of the necessary inertial forces in the jet node (continuum), so necessary to drive the entire mechanical oscillating system.

The free bending oscillations of the continuum section using Krylov functions are considered and its first natural frequency of oscillations is established, which almost completely coincides with the corresponding partial frequency of the reference discrete model. The forced oscillations of the continuum section are considered and a mathematical model in the form of a system of equations describing its motion is formed on the basis of circular and hyperbolic Krylov functions. By selecting the frequency matrix, the value of the first natural frequency of oscillations of the continuum is confirmed again. A mathematical model of a discrete-continuous oscillatory system of a vibrating machine is formed, in which a discrete part of the system is combined with a continuous one due to reactions in the supports of a continuous section. The values of constant parameters and reactions in the supports are determined. The amplitude-frequency characteristic of the discrete-continuous oscillatory system is constructed, which is completely consistent with the characteristic of the reference discrete three-mass system. This allowed us to assert the presence in the synthesized structure of parameters and properties of the reference discrete system. The scheme of deflections of the continuum section is constructed, its strength is calculated. The natural frequency of oscillations was checked by the approximate Rayleigh-Ritz method. Using the same method, the consolidated mass and the reduced

stiffness of the continuum section were established, which almost completely agreed with the calculated values.

The design and experimental part of the dissertation is devoted to the final formation and research of the discrete-continuum inter-resonant vibration machine. Considerable attention is paid to the creation of a controlled crank drive, which differs from existing vibrators by the ability to change the value of the eccentricity in a wide range and smoothly control the frequency of perturbation. The listed advantages provide unobstructed entry of turns of the crank in an inter-resonance zone, bypassing Sommerfeld's effect; simplify the process of regulating the modes of operation of vibrating equipment in accordance with changing technological or production conditions. The design and operational parameters of the proposed controlled crank mechanism are substantiated. Using the method of closed vector contours, the kinematics of the mechanism is described, on the basis of which analytical expressions are obtained that describe the dependence of the change in eccentricity on the movement of the controlled slider. Appropriate graphs are constructed. The correctness of the obtained expressions and the results of numerical modeling was confirmed by simulation modeling of the motion of the mechanism. Based on the analysis of the mechanism, a controlled crank drive was developed and implemented in a vibrating conveyor-separator.

The scheme of placement and fastening of elastic elements connecting the active and intermediate masses of the vibrating conveyor-separator is developed. Analytical calculations of their stiffness parameters were performed, which agreed with the discrete mathematical model. The geometrical parameters of elastic elements are established and the stresses arising in them are analytically calculated. Computer modeling of the elastic element by the finite element method is carried out. This allowed us to verify the results of analytical calculations of stiffness and maximum stresses that occur in it.

Based on the condition of minimizing the transfer of dynamic loads to the foundation, the required frequency of natural oscillations of the system on vibration isolators was selected, on the basis of which their calculation for rigidity and strength

was performed. The reliability of the obtained results was confirmed by computer simulation by the finite element method. This completed the design part and provided all the initial data for the creation of an experimental sample of a discrete-continuous interresonant vibration conveyor-separator.

The partial frequency of oscillations of the continuum section was experimentally established, which allowed to indirectly confirm the presence of inertial-rigid parameters laid down during the calculation. On the basis of the removed time dependences of the motion of the active and intermediate masses, the presence of the laid down calculated amplitude-frequency characteristics was experimentally confirmed, which in general indicated the correctness of the developed methodology of dissertation research. The unobstructed entry into the inter-resonance zone of the controlled crank drive has been experimentally confirmed, which allowed to assert the validity of the use of the proposed structures during the creation of highly efficient inter-resonant vibrating machines.

On the basis of the design part the methodology of construction of the discrete-continuous inter-resonant vibrating conveyor-separator was formed, where for the first time hybrid (discrete-continuous) structures of oscillatory systems were used, the difference of which is the introduction as a third (reactive) mass of the continuum. consolidated stiffness and consolidated mass. This allowed to effectively provide inter-resonant modes of operation, revealing the latent potential of the synthesized systems due to the synergy of discrete and continuous oscillatory systems.

**Keywords:** discrete-continuous mechanical oscillatory system, vibrating machine, interresonant mode of operation, natural frequency of oscillations.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати*

1. Ланець О. С. Виявлення шляхів подальшого вдосконалення високо-ефективних міжрезонансних коливальних систем. / О. С. Ланець, О. Ю. Качур // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні, 2017. – Вип. 51. – С. 62 – 65.
2. Ланець О. С., Качур О. Ю. Тримасова коливальна система. Патент на корисну модель 126876 U Україна, подано 29. 01. 2018, опуб. 10. 07. 2018.
3. Lanets O.S. Classical approach to determining the natural frequency of continual subsystem of three-mass inter-resonant vibratory machine / O. S. Lanets, O. Yu. Kachur, V. M. Korendiy // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2019. – Vol. 5, no. 3 – 4. – pp. 77 – 87.
4. Korendiy V. Substantiation of parameters and modelling the operation of three-mass vibratory conveyer with directed oscillations of the working element / V. Korendiy, O. Kachur, Y. Novitskyi, V. Mazuryk, V. Sereda // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2019. – Вип. 53. – С. 84 – 100.
5. Ланець О. С. Встановлення власної частоти континуальної ділянки міжрезонансної вібронашини з використанням наближеного методу Релея-Рітца. / О. С. Ланець, О. Ю. Качур, В. М. Боровець, П. Р. Дмитерко, І. А. Деревенько, А. Я. Зварич // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2020. – Вип. 54. – С. 5 – 15.
6. Lanets O. S. Derivation of analytical dependencies for determining stiffness parameters of vibration isolators of vibratory machine / O. S. Lanets, O. Yu. Kachur, V. M. Korendiy // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2020. – Vol. 6, no. 3 – 4. – pp. 1 – 8.

7. Korendiy V. Determination of inertia-stiffness parameters and motion modelling of three-mass vibratory system with crank excitation mechanism / V. Korendiy, O. Lanets, O. Kachur, P. Dmyterko, R. Kachmar // *Vibroengineering PROCEDIA*. – 2021. – Vol. 36, pp. 7 – 12.

8. Lanets O. Determination of the first natural frequency of an elastic rod of a discrete-continuous vibratory system / O. Lanets, O. Kachur, V. Korendiy, P. Dmyterko, S. Nikipchuk, I. Derevenko // *Vibroengineering PROCEDIA*. – 2021. – Vol. 37, pp. 7 – 12.

9. Lanets O. Controllable Crank Mechanism for Exciting Oscillations of Vibratory Equipment / O. Lanets, O. Kachur, V. Korendiy, V. Lozynskyy // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*, – 2021. – Vol. 2 pp. 43 – 52.

*Наукові праці апробаційного характеру та праці,  
в яких опубліковані додаткові наукові результати*

10. Корендій В. М., Качур О. Ю. Динаміка руху мобільного вібраційного робота з віброударним режимом функціонування // *Вібрації в техніці та технологіях: тези доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 140-річчю випуску інженерів-механіків у Львівській політехніці (Львів, 11–12 жовтня 2018 р.)*, Львів. – С. 68 – 69.

11. Корендій В. М., Гурей В. І., Качур О. Ю. Динаміка руху мобільного вібраційного робота з двома дебалансними віброзбудниками // *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 25–26 жовтня 2018 р.)*, Львів: Кінпатрі ЛТД. – С. 123 – 125.

12. Корендій В. М., Качур О. Ю., Дмитерко П. Р., Новіцький Ю. Я. Моделювання роботи тримасового вібротранспортера з напрямленими коливаннями робочого органа // *XIV Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 23 – 24 травня 2019 р.)*: Матеріали симпозіуму, Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2019. – С. 136 – 138.

13. Качур О. Ю. Аналіз кривошипно-шатунного приводу міжрезонансної вібраційної машини // Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Експлуатаційна та сервісна інженерія» (м. Харків, 15 – 16 жовтня 2020 р.), Харків: ХНТУСГ, 2020. – С. 9 – 11.

14. Качур О. Ю. Встановлення центра швидкостей стержня, як тіла з розподіленими параметрами, що перебуває в коливальному русі // V Міжнародна наукова конференція з нових тенденцій у науці та освіті «Theoretical and scientific bases of development of scientific thought», (м. Рим, Італія, 16 – 19 лютого 2021 р.), Рим, 2021. – С. 642 – 644.

15. Korendiy V., Lanets O., Kachur O. Determination of inertia-stiffness parameters and motion modelling of three-mass vibratory system with crank excitation mechanism // 50th International JVE Conference (м. Дубаї, Об'єднані Арабські Емірати, 25 – 27 березня 2021 р.).

16. Качур О. Ю. Експериментальне встановлення частоти вимушених коливань дискретно-континуальної міжрезонансної коливальної системи // XIX Всеукраїнська науково-технічна конференції «Потураївські читання», (м. Дніпро, 22 квітня 2021 р.), Дніпро, 2021. – С. 38.

17. Lanets O., Kachur O., Korendiy V. Determination of the first natural frequency of an elastic rod of a discrete-continuous vibratory system // 51st International JVE Conference (м. Дублін, Ірландія, 7 – 8 травня 2021 р.).

18. Ланець О. С., Качур О. Ю., Корендій В. М. Розрахунок на міцність континуальної ділянки вібромашини // XV Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : матеріали симпозіуму (м. Львів, 20 – 21 травня 2021 р.) – 2021. – С. 8–10.

19. Корендій В. М., Качур О. Ю., Новіцький Ю. Я., Дмитерко П. Р. Вібраційний бункерний живильник одномасової структури // XV Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : матеріали симпозіуму (м. Львів, 20 – 21 травня 2021 р.) – 2021. – С. 153–155.