

**М. А. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. М. ТКАЧУК, І. Є. КЛОЧКОВ, М. В. ПРОКОПЕНКО, В. В. ТРЕТЯК, І. О. ВОЛОШИНА**

### **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОГРЕСИВНИХ РІШЕНЬ ВИСОКООБЕРТОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ МАШИН ВІЙСЬКОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА КРИТЕРІЯМИ МІЦНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ РУХУ**

У сучасних умовах однією із суттєвих перепон на шляху забезпечення підвищеної потужності, працездатності та ресурсу машин військового та цивільного призначення є вичерпані можливості традиційних технічних рішень основних елементів та систем. У першу чергу це стосується високообертових елементів, зокрема, турбін та роторних частин нагнітачів повітря двигунів внутрішнього згорання, трансмісій, приводів, гідромашин тощо. Високі швидкості обертання спричиняють динамічні процеси, які потенційно можуть призводити до проблем із міцністю, жорсткістю та стійкістю руху. Із метою обґрунтування прогресивних технічних рішень високообертових частин необхідна розробка відповідних теоретичних основ дослідження процесів, що реалізуються у цих елементах. Інтерес становить, зокрема, дослідження напружено-деформованого стану елементів роторних систем. Важливе також визначення жорсткісних властивостей пружних опор. У свою чергу, це впливає на стійкість руху роторних систем. Це створює основу для встановлення закономірностей впливу варійованих параметрів на характеристики динамічних процесів і станів. У роботі на єдиній методологічній основі запропоновано розробити комплексну математичну та чисельну моделі напружено-деформованого стану та стійкості руху високообертових елементів конструкцій. Ці моделі описуються загальним набором варійованих параметрів. Формуються загальні критерії та обмеження. Пошук прогресивних рішень здійснюється шляхом задоволення певним комплексним критеріям і обмеженням. Варійованими є проектні параметри та експлуатаційні режими. При цьому розв'язання задач аналізу здійснюється із використанням єдиної параметричної моделі.

**Ключові слова:** машини військового та цивільного призначення, високообертові елементи конструкцій, напружено-деформований стан, критична швидкість обертання

**Н. А. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСКИЙ, Н. Н. ТКАЧУК, И. Е. КЛОЧКОВ, Н. В. ПРОКОПЕНКО, В. В. ТРЕТЬЯК, И. А. ВОЛОШИНА**

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБОСНОВАНИЯ ПРОГРЕССИВНЫХ РЕШЕНИЙ ВИСОКООБОРОТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН ВОЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ**

В современных условиях одним из существенных препятствий для обеспечения повышенной мощности, работоспособности и ресурса машин военного и гражданского назначения являются исчерпанные возможности традиционных технических решений основных элементов и систем. В первую очередь это касается высокооборотных элементов, в частности, турбин и роторных частей нагнетателей воздуха двигателей внутреннего сгорания, трансмиссий, приводов, гидромашин и т.д. Высокие скорости вращения вызывают динамические процессы, которые могут приводить к проблемам с прочностью, жесткостью и устойчивостью движения. С целью обоснования прогрессивных технических решений высокооборотных частей необходима разработка соответствующих теоретических основ исследования реализуемых в этих элементах процессов. Интерес представляет, в частности, исследование напряженно-деформированного состояния элементов роторных систем. Важно также определение жестких свойств упругих опор. В свою очередь, это влияет на устойчивость движения роторных систем. Это создает базу для установления закономерностей влияния варьируемых характеристик на свойства динамических процессов и состояний.

**Ключевые слова:** машины военного и гражданского назначения, высокооборотные элементы конструкций, напряженно-деформированное состояние, критическая скорость вращения

**М. А. ТКАЧУК, А. ГРАБОВСКИЙ, М. М. ТКАЧУК, И. КЛОЧКОВ, М. ПРОКОПЕНКО, В. ТРЕТЯК, И. ВОЛОШИНА**

### **THEORETICAL BASIS FOR ADVANCED SOLUTIONS OF HIGH RPM ELEMENTS OF CIVIL AND MILITARY MACHINES BASED ON STRENGTH AND DYNAMIC STABILITY CRITERIA**

In modern conditions, one of the significant obstacles to ensuring increased power, efficiency and resource of military and civilian vehicles is the exhausted possibilities of traditional technical solutions of basic elements and systems. This primarily applies to high-speed elements, in particular, turbines and rotary parts of air blowers of internal combustion engines, transmissions, drives, hydraulic machines and more. High speeds cause dynamic processes that can potentially lead to problems with strength, rigidity and stability. In order to substantiate the progressive technical solutions of high-speed parts, it is necessary to develop appropriate theoretical foundations for the analysis of processes that occur in these elements. The stress-strain state of the elements of rotor systems is of particular interest. It is also important to determine the stiffness properties of the elastic supports. In turn, this affects the stability of the rotor systems. This creates a basis for establishing patterns of influence of variable parameters on the characteristics of dynamic processes and states. A complex mathematical and numerical models of the stress-strain state and stability of motion of high-speed structural elements is developed on a unified methodological basis. These models are described by a common set of varied parameters. General criteria and restrictions are formulated. The search for advanced solutions is carried out by meeting certain complex criteria and constraints. Design parameters and operational modes are varied. The analysis problems are solved using a unified parametric model.

**Keywords:** civil and military machines, RPM structural parts, stress-strain state, critical rotational velocity

**Вступ.** Проблема обґрунтування технічних рішень при проектуванні високообертових елементів конструкцій (ВОЕК), зокрема, сучасних двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) великої потужності, трансмісій, приводів, гідромашин тощо, має комплексний характер. Самі процеси у цих

високообертових елементах є мультифізичними, а синтез проектних рішень – багатокритеріальним. Тому для вирішення цієї проблеми доцільно

© М. А. Ткачук, А. В. Грабовський, М. М. Ткачук, І. Є. Клочков, М. В. Прокопенко, В. В. Третяк, І. О. Волошина, 2022

удосконалювати наукові основи узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних механічних системах. Це становить основу для варіативного аналізу реакції цих систем на зміни технічних рішень, а, відповідно, – і для цілеспрямованого їх поліпшення задля досягнення підвищення технічних і тактико-технічних характеристик (ТіТТХ) машин військового та цивільного призначення (МВЦП), їхніх агрегатів та вузлів. Існуючі розробки з цього напрямку потребують розвитку, а дослідження – реалізації із точки зору задоволення потреб практики створення МВЦП із високими характеристиками. Ці обставини зумовили напрямки теоретичних досліджень, які складають зміст цієї роботи.

**Аналіз існуючих моделей та методів дослідження процесів і станів у високообертових елементах сучасних машин.** Високообертові елементи конструкцій сучасних двигунів, трансмісій, турбін, гідромашин, приводів та інших машин, агрегатів та обладнання, що працюють в умовах інтенсивних навантажень, давно привертають увагу із точки зору аналізу процесів і станів, що в них реалізуються. У першу чергу це стосується напружено-деформованого стану (НДС), критичних швидкостей обертання, пружно-пластичного деформування, контактної взаємодії тощо. Крім того, значне місце у ряду актуальних проблем займають методи розв'язання обернених задач, тобто обґрунтування технічних рішень подібних високообертових елементів конструкцій, які задовольняють певним вимогам до різноманітних характеристик машин, агрегатів чи обладнання. Зокрема, мова йде про міцність, жорсткість, стійкість руху тощо.

Із зазначених напрямків існує широка множина робіт у науково-технічній літературі.

Механіка суцільного середовища, пошкоджуваності, динаміки та міцності має значні наукові здобутки у різних напрямках, у т. ч. – у науковій школі член-кор. НАНУ проф. М. І. Бобира [1, 2]. Контактна техніка та механіка руйнування досягли передового світового рівня у наукових школах акад. Панасюка В.В. та Підстригача Я.С. [3, 4]. У роботах представників цих шкіл отримали розвиток новітні математичні моделі процесів і станів у складних конструкціях. Так, у [1–4] міститься опис новітніх розробок у галузі динаміки та міцності високообертових елементів конструкцій, а також контактуючих тіл та зв'язаних полів. Це суттєво підвищує рівень адекватності моделей для обґрунтування технічних рішень на етапах проектних досліджень.

Проте зазначені розробки не можуть бути напряму інтегровані у ті чи інші предметні області, наприклад, бронетанкобудування. Разом із тим розробки ЦНДІ ОВТ ЗСУ (Чепков І.Б., Васьківський М.І., Лапицький С.В., Голуб В.А., Бісик С.П. та ін.) [5–7] спрямовані на забезпечення високих тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин на основі системних підходів та моделей. Проте ці підходи та моделі у багатьох

випадках потребують залучення більш просунутих у окремих аспектах моделей та методів, зокрема, різних частин механіки.

Роботи деяких зарубіжних та вітчизняних вчених [8–19] спрямовані на розв'язання подібних актуальних проблем, проте у них не розкриваються усі аспекти, які складають певну конфіденційну інформацію чи «ноу-хау». Крім того, вони не відтворюють особливості науково-технічних розробок вітчизняних науково-технічних шкіл. Відповідно, порушується принцип системного підходу.

Отже, об'єктивно склалося протиріччя між нагальними потребами у галузі вітчизняного машинобудування, з одного боку, та науковими засобами їх задоволення, – з іншого. Відповідно, для обґрунтування перспективних технічних рішень високообертових елементів конструкцій актуальною є якраз проблема розвитку нових комплексних моделей, які враховують нелінійні ефекти контактної взаємодії, пружно-пластичного деформування та втрати стійкості руху, а також дослідження впливу варіюваних параметрів на характеристики високообертових елементів МВЦП.

Якраз на такі комплексні дослідження спрямовано низку робіт [20–23]. Методологічна основа досліджень, на відміну від робіт [1–19], авторами цих робіт закладена. Зокрема, на відміну від робіт [1–4, 8–10] отримав подальший розвиток метод узагальненого параметричного моделювання складних об'єктів, що дає можливість варіювати моделі об'єктів досліджень задля досягнення тих чи інших технічних або тактико-технічних характеристик. На відміну від робіт [5–7], розвинені більш досконалі скінченно- та гранично-елементні постановки задач аналізу напружено-деформованого стану тіл складної форми із урахуванням динаміки, контактної взаємодії та пружно-пластичного деформування.

У цілому, на противагу та у доповнення існуючих розробок [1–19] авторами [20–23], на відміну від існуючих, розроблено підхід, що дає змогу урахувати комплекс чинників, важливих для високообертових елементів машинобудівних конструкцій, причому у їх взаємовпливі. Якраз на цій основі можливе здійснення досліджень із адекватними результатами та обґрунтованими рекомендаціями стосовно технічних рішень із високими ТТХ. Таким чином, на цій базі на системній основі можливе вирішення важливої наукової та практичної проблеми механіки і машинобудування.

Таким чином, натепер відсутні теоретичні основи нових підходів, методів дослідження та комплексної математичної моделі НДС та критичних швидкостей обертання високообертових елементів конструкцій, які би дали можливість на єдиній модельно-методологічній базі обґрунтовувати прогресивні технічні рішення при створенні машин військового та цивільного призначення із високими ТіТТХ. Створення таких підходів, моделей та методів склало напрямки розробок у цій роботі на розвиток напрямків та розробок, описаних у статтях [20–23].

*Мета роботи* – розроблення наукових основ дослідження та установлення закономірностей впливу проектно-технологічних чинників на міцність, жорсткість та стійкість руху високообертових елементів конструкцій машин, агрегатів та обладнання задля розроблення на цій базі рекомендацій щодо підвищення рівня технічних і тактико-технічних характеристик машин військового та цивільного призначення у цілому.

Досягнення цієї мети передбачає виконання наступних завдань:

1. Розроблення удосконалених нелінійних моделей напружено-деформованого стану високообертових елементів конструкцій із урахуванням контактної взаємодії та пружно-пластичного деформування.

2. Створення удосконалених нелінійних моделей напружено-деформованого стану пружних опор для підвищення податливості опор ВОЕК.

3. Створення моделей та методів досліджень критичних швидкостей обертання ВОЕК.

4. Формування загальних підходів до досліджень напружено-деформованого стану та критичних швидкостей обертання високообертових елементів конструкцій за варійованих проектно-технологічних параметрів і режимів експлуатації.

5. Визначення напрямків досліджень задля установлення закономірностей впливу варійованих параметрів на технічні характеристики ВОЕК.

**Основні підходи до вирішення проблем обґрунтування проектних рішень високообертових елементів конструкцій.** Основна ідея підходу, що пропонується – про необхідність, важливість та ефективність не набору ізольованих, а саме комплексних досліджень впливу варійованих параметрів високообертових елементів конструкцій на їх міцність, жорсткість і стійкість руху та рівень ТіТТХ елементів, двигунів, приводів, агрегатів і виробів у цілому.

Для розроблення наукових основ обґрунтування прогресивних технічних рішень ВОЕК сформовані наступні ідеї:

1) традиційні моделі, методи і методики розрахунку високообертових елементів конструкцій вичерпали свої можливості щодо підвищення ТіТТХ машин військового та цивільного призначення, оскільки не враховують суттєво більш інтенсивні режими навантажень та нелінійні процеси і стани, що при цьому виникають; це спонукає до здійснення досліджень, які урахують вплив комплексу чинників на процеси і стани у цих елементах, бажано – у єдиній узагальненій моделі;

2) сучасні МВЦП, зокрема, високофорсовані двигуни, трансмісії та приводи, вийшли на межі зростання своїх характеристик, з метою подолання котрих необхідні нові технічні рішення їх високообертових елементів задля підвищення міцності, працездатності та ресурсу;

3) прогресивні технічні рішення ВОЕК можливі не на основі частинних критеріїв за міцністю, жорсткістю та стійкістю руху, а за комплексом цих критеріїв у їх взаємозв'язку;

4) дослідження процесів і станів у ВОЕК необхідно будувати не на традиційних спрощених лінійних чи лінеаризованих моделях, а на нових створених нелінійних моделях, які хоч і більш складні, проте і більш адекватні, а результати та рішення, отримувані із їх застосуванням, – більш обґрунтовані та прогресивні.

Для досягнення заявлених завдань задіяні наступні гіпотези:

1. Задля підвищення потужності високообертових елементів конструкцій, у першу чергу – високофорсованих двигунів, що дає можливість досягти та перевершити світовий рівень показників питомої енергонасиченості існуючих та проєктованих МВЦП, доцільно варіювати не один або кілька проектно-технологічних параметрів, а їх множину, при цьому не порушуючи цілісність досліджуваної моделі та взаємозв'язки окремих елементів.

2. Задля більш ефективного використання властивостей ВОЕК раціональним є створення у них сприятливого попереднього напруженого стану шляхом технологічних операцій зі швидкостями обертання вище робочого діапазону.

3. Для визначення напружено-деформованого стану елементів високообертових елементів конструкцій, що піддаються впливу динамічного навантаження, ефективним, адекватним і точним є моделювання процесу не за спрощеними, а за повними (нелійними) моделями, що враховують історію навантаження.

4. Жорсткісні характеристики пружних опор ВОЕК, на відміну від лінійних моделей, що застосовуються, є суттєво нелійними. Це спонукає для їх визначення здійснювати окреме дослідження деформування елементів цих опор у їх контактній взаємодії.

5. При визначенні критичних швидкостей обертання ВОЕК необхідно враховувати, з одного боку, усі значущі фізичні чинники, а, з іншого, - особливості технічних і технологічних рішень конкретних досліджуваних об'єктів.

Перелічені аспекти були враховані при здійсненні розробок, описаних нижче.

**Підхід, методи, засоби та напрямки досліджень.** При розробці наукових основ здійснення досліджень пропонується підхід, який поєднує аналіз міцності, жорсткості та стійкості руху високообертових елементів конструкцій на основі єдиної комплексної нелінійної математичної моделі процесів і станів, методів дослідження та обґрунтування за цими критеріями відповідних технічних рішень задля підвищення ТіТТХ вітчизняних машин військового та цивільного призначення.

Новизною цього підходу, по-перше, є об'єднання на єдиній методологічній основі, з одного боку, проектних, технологічних, експлуатаційних чинників, а, з іншого – математичних та чисельних моделей фізико-механічних процесів і станів, які в них реалізуються, а, по-друге – урахування не одного, а комплексу критеріїв при формуванні рекомендацій із підвищення технічного рівня ВОЕК, зокрема, двигунів

і виробів у цілому. Отже, на відміну від існуючих, такий підхід створює можливість не тільки адекватного моделювання досліджуваних процесів і станів, але й забезпечення необхідного рівня ТіТТХ високообертових елементів конструкцій шляхом цілеспрямованого варіювання проектно-технологічних параметрів.

Крім того, новизна підходу полягає у розвиткові нових єдиних узагальнених математичних моделей НДС при пружно-пластичному деформуванні, контактній взаємодії тіл складної форми та стійкості руху роторних систем. В основі цих моделей – варіаційні принципи типу Кальєра, теорія варіаційних нерівностей, причому із урахуванням історії навантаження.

При чисельній реалізації до досліджень ВОЕК адаптуються методи скінченних та граничних елементів, діаграми Кемпбелла, напіваналітичні експрес-моделі опорних структур.

На основі застосування розроблених моделей та методів можуть бути установлені закономірності впливу варіювання проектно-технологічних параметрів на технічні характеристики високообертових елементів конструкцій.

Ці закономірності є базовими при обґрунтуванні прогресивних технічних рішень ВОЕК та у цілому МВЦП, які забезпечують підвищення їх ТіТТХ до сучасного світового рівня.

Науково-методологічна обґрунтованість підходу, що пропонується, та його прикладна ефективність підтверджені, з одного боку, у серії попередніх досліджень, а з іншого – у низці попередньо розроблених рекомендацій щодо проектно-технологічних рішень стосовно елементів машин військового та цивільного призначення. Вони пройшли перевірку та підтвердження ефективності.

У ході розробок задля досягнення поставленої мети здійснені такі розробки.

1. Розвинений та адаптований метод узагальненого параметричного моделювання фізико-механічних процесів і станів у ВОЕК за рахунок його розвитку задля застосування на новій, доповненій множині проектно-технологічних та експлуатаційних чинників, що, на відміну від попередніх розробок, дає можливість забезпечувати необхідний рівень їх міцності, жорсткості та стійкості руху, причому із побудовою єдиної узагальненої моделі напружено-деформованого стану та критичних швидкостей обертання.

2. Нові засоби досліджень у вигляді структури спеціалізованих програмних модулів та параметризованих чисельних моделей, які, на відміну від традиційних, дають можливість здійснення багатоваріантних досліджень та цілеспрямованого поліпшення технічних рішень ВОЕК за критеріями міцності, жорсткості та стійкості руху.

3. Нова методологія досліджень, яка базується на побудові більш адекватних комплексних нелінійних моделей із урахуванням контактної взаємодії та пружно-пластичного характеру деформування матеріалів, а також динаміки роторних систем.

Структура і напрямки подальших досліджень передбачають такі складові.

1. Розвиток загальних підходів, моделей та методів досліджень міцності ВОЕК при дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

2. Розроблення математичних і чисельних моделей та методів аналізу міцності та жорсткості високообертових елементів конструкцій, стійкості їх руху, пружно-пластичного деформування матеріалів при дії експлуатаційного навантаження.

3. Формування напрямків досліджень впливу варійованих проектно-технологічних параметрів на міцність, жорсткість та стійкість руху досліджуваних ВОЕК та рекомендацій щодо обґрунтування технічних рішень, які забезпечують досягнення їх заданих ТіТТХ за критеріями міцності, жорсткості та стійкості руху.

**Висновки.** Прогресивність розробленого підходу полягає у принципово новій методології обґрунтування технічних рішень високообертових елементів конструкцій, що, на відміну від одиничних чинників як у традиційних підходах, базується на урахуванні комплексу таких чинників у їх взаємозв'язку та взаємовпливі задля досягнення ТіТТХ вітчизняних машин військового та цивільного призначення рівня, що переважає світовий.

Зокрема, у рамках розробленого підходу розв'язані такі задачі та одержані нові наукові результати:

1) запропонована структура комплексної узагальненої параметричної моделі напружено-деформованого стану та критичних швидкостей обертання високообертових елементів конструкцій вітчизняних МВЦП, яка поєднує, на відміну від існуючих, у єдиній множині проектні, технологічні параметри, режими експлуатації та бойового застосування; це створює принципові переваги при розв'язанні прикладних задач, з одного боку, аналізу процесів і станів, а, з іншого – обґрунтування таких технічних рішень, які забезпечують їх високі ТіТТХ;

2) аналіз результатів досліджень напружено-деформованого стану ВОЕК вітчизняних МВЦП, на відміну від традиційних спрощених методик, здійснюється на розроблених математичних моделях із більш високим ступенем адекватності, що, у свою чергу, дає можливість розробки більш обґрунтованих рекомендацій стосовно обґрунтування технічних рішень задля досягнення заданих ТіТТХ цих машин;

3) для моделювання фізико-механічних процесів і станів елементів МВЦП будуються суттєво розвинені моделі у частині урахування пружно-пластичного характеру деформування, навантаження відцентровими силами та контактної взаємодії, що створює переваги порівняно із традиційними спрощеними методиками розрахунків;

4) на розробленій базі можливе установлення закономірностей зміни характеристик міцності, жорсткості та стійкості руху від варійованих проектно-технологічних параметрів, що дає основу, на відміну від традиційних методик, для визначення комплексних залежностей між компонентами ТіТТХ

та технічними рішеннями ВОЕК машин військового та цивільного призначення;

5) уможлиблюється обґрунтування нових проектно-технологічних рішень із забезпеченням міцності, жорсткості та стійкості руху найбільш навантажених та відповідальних високооберткових елементів конструкцій та досягнення заданих ТіТТХ вітчизняних МВЦП на світовому рівні.

Таким чином, порівняно із відомими підходами, у відповідному параметричному просторі досягається інтеграція, з одного боку, більш адекватних і достовірних моделей досліджуваних процесів і станів, а, з іншого – проектно-технологічних параметрів і компонент ТіТТХ машин військового та цивільного призначення. Це переносить можливості фундаментальних теоретичних основ аналізу у конкретні предметні області. При цьому формується комплексна, а не однофакторна модель, яка, на відміну від існуючих, пов'язує компоненти ТіТТХ найбільш навантажених та відповідальних високооберткових елементів конструкцій вітчизняних МВЦП із характеристиками їх міцності, ресурсу та стійкості руху, що визначаються на основі більш обґрунтованих залежностей та закономірностей. Крім того, порівняно із попередніми, розроблені моделі є варіюваними, тобто створена можливість визначення раціональних технічних рішень ВОЕК шляхом цілеспрямованого їх пошуку на основі організації того чи іншого алгоритму обґрунтування у розширеному узагальненому параметричному просторі.

Відповідно, розроблені методологічні основи проектних досліджень напружено-деформованого стану і критичних швидкостей обертання високооберткових елементів конструкцій машин військового та цивільного призначення та подальшого синтезу їх прогресивних технічних рішень за критеріями міцності, жорсткості та стійкості руху. Вони будуть реалізовані у ході подальших досліджень цих елементів машинобудівних конструкцій.

#### Список літератури

1. Bobyr', N.I.; Koval', V.V. Damage Contribution to the Assessment of the Stress-Strain State of Structure Elements. *Strength of Materials*. 2017, vol. 49, iss. 3, pp. 361–368.
2. Бобир М. І., Бабенко А. Є., Лавренко Я. І., Халімон О. П. *Динаміка та довговічність високошвидкісних прецизійних центрифуг: Монографія*. Нац. техн. ун-т України «КПІ імені Ігоря Сікорського». Київ: А, 2017. 171 с.
3. Kozachok O.P., Slobodian B.S., Martynyak R.M. Contact between an elastic body and a rigid base with periodic array of quasielliptic grooves partially filled with liquid wetting the surfaces of the bodies. *Journal of Mathematical Sciences*. 2019, vol. 240, no. 2, pp. 162–172
4. Nachkevych O.R., Kushnir R.M. Selected Problems of the Mechanics of Coupled Fields. *Journal of Mathematical Sciences*. 2018, vol. 229, no. 2, pp. 115–132
5. Чепков І.Б. Першочергові завдання у військово-технічній сфері. *VI Міжн. наук.-практ. конф. «Перспективи розвитку ОВТ». Тези доп.* 2018. Р. С. 20–24
6. Чепков І.Б. Використання передових наукових знань, технологічних розробок та інновацій для зміцнення обороноздатності держави та досягнення військової переваги у технологічній сфері. *Вісник Національної академії наук України*, 2021. № 6. С. 59–62
7. Гусяков О.М., Довгополий А.С., Чепков І.Б. Критичні технології для створення наземних робототехнічних

комплексів важкого та середнього класів. *Озброєння та військова техніка*. 2020. С. 24–34

8. Barber J.R. *Contact Mechanics*. Springer International Publishing. 2018. 585 p.
9. Andrew Feickert *The Army's Optionally Manned Fighting Vehicle (OMFV) Program: Background and Issues for Congress, Congressional Research Service Report for Members and Committees of Congress*, updated July 13, 2020, <https://fas.org/sgp/crs/weapons/R45519.pdf>
10. An Assessment of U.S. Military Power. In: *The Heritage Foundation* 2021, pp. 337–354 [https://www.heritage.org/sites/default/files/2020-11/2021\\_IndexOfUSMilitaryStrength\\_ASSESSMENT\\_POWER\\_ALL.pdf](https://www.heritage.org/sites/default/files/2020-11/2021_IndexOfUSMilitaryStrength_ASSESSMENT_POWER_ALL.pdf)
11. Reddy, Mutra Rajasekhara, and J. Srinivas. Vibration analysis of a support excited rotor system with hydrodynamic journal bearings. *Procedia Engineering*. 144 (2016): 825-832.
12. Han, Qinkai, and Fulei Chu. Parametric instability of flexible rotor-bearing system under time-periodic base angular motions. *Applied Mathematical Modelling*. 39, no. 15 (2015): 4511–4522.
13. Avramov, K., M. Shulzhenko, O. Borysiuk, Christophe Pierre. Influence of periodic excitation on self-sustained vibrations of one disk rotors in arbitrary length journals bearings. *International journal of non-linear mechanics*. 77 (2015): 274–280.
14. Cha, Matthew, and Sergei Glavatskih. Nonlinear dynamic behaviour of vertical and horizontal rotors in compliant liner tilting pad journal bearings: Some design considerations. *Tribology International*. 82 (2015): 142–152.
15. Martynenko, G. Resonance mode detuning in rotor systems employing active and passive magnetic bearings with controlled stiffness. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 13 (2016): 3293.
16. Azraai, M. R., G. Priyandoko, A. R. Yusoff, and M. F. F. A. Rashid. Parametric Optimization of magneto-rheological fluid damper using particle swarm optimization. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 11 (2015): 2591.
17. Ran, S., Hu, Y., Wu, H., & Cheng, X. (2018). Resonance Vibration Control for AMB Flexible Rotor System Based on  $\mu$ -Synthesis Controller. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1-16.
18. Zhang, Yipeng, Lidong He, Jianjiang Yang, Fangteng Wan, and Jinji Gao. Vibration Control of an Unbalanced Single-Side Cantilevered Rotor System with a Novel Integral Squeeze Film Bearing Damper. *Applied Sciences* 9, no. 20 (2019): 4371.
19. Deng, Huaxia, YifanDiao, Jin Zhang, Peng Zhang, Mengchao Ma, Xiang Zhong, and Liandong Yu. Three-dimensional identification for unbalanced mass of rotor systems in operation. *Applied Sciences*. 8, no. 2 (2018): 173.
20. Tkachuk M. M., Grabovskiy A., Tkachuk M. A., Zarubina A., Lipeyko A. Analysis of elastic supports and rotor flexibility for dynamics of a cantilever impeller. *Journal of Physics: Conference Series*. 1741 (2021). 012043 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012043>
21. Tkachuk, M., Grabovskiy, A., & Tkachuk, A. Numerical and analytical analysis methods for radial response of flexible ring dampers. *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering: Proceedings of KOD 2021. Volume 109 of Mechanisms and Machine Science*. Springer. 2022
22. Tkachuk, M., Shut, O., Marchenko, A., Grabovskiy, A., Lipeyko, A., Polyvianchuk, A., Gritsuk, I., Tkachuk, M. Strength and stability criteria limiting geo-metrical dimensions of a cantilever impeller. *SAE Technical Paper. SAE International*. 2021, pp 2021-01-5056
23. Marchenko A., Grabovskiy A., Tkachuk M., Shut O. Detuning of a supercharger rotor from critical rotational velocities. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 137–145

#### References (transliterated)

1. Bobyr', N.I.; Koval', V.V. Damage Contribution to the Assessment of the Stress-Strain State of Structure Elements. *Strength of Materials*. 2017, vol. 49, iss. 3, pp. 361–368.
2. Bobyr M. I., Babenko A. Ye., Lavrenko Ya. I., Khalimon O. P. *Динаміка та довговічність високошвидкісних прецизійних центрифуг: Монографія*. Nats.tekhn.un-t Ukrainy «KPI imeni Ihoria Sikorskoho». Kyiv: A, 2017. 171 p.
3. Kozachok O.P., Slobodian B.S., Martynyak R.M. Contact between an elastic body and a rigid base with periodic array of

- quasielliptic grooves partially filled with liquid wetting the surfaces of the bodies. *Journal of Mathematical Sciences*. 2019, vol. 240, no. 2, pp. 162–172
4. Hachkevych O.R., Kushnir R.M. Selected Problems of the Mechanics of Coupled Fields. *Journal of Mathematical Sciences*. 2018, vol. 229, no. 2, pp. 115–132
  6. Chepkov I.B. Vykorystannia peredovykh naukovykh znan, tekhnolohichnykh rozrobok ta innovatsii dlia zmitsnennia oboronozdatnosti derzhavy ta dosiahnennia viiskovoi perevahy u tekhnolohichnii sferi. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, 2021, no. 6, pp. 59–62
  7. Husliakov O.M., Dovhopolyi A.S., Chepkov I.B. Krytychni tekhnolohii dlia stvorennia nazemnykh robototekhnichnykh kompleksiv vazhkoho ta serednoho klasiv. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. 2020, pp. 24–34
  8. Barber J.R. *Contact Mechanics*. Springer International Publishing, 2018. 585 p.
  9. Andrew Feickert *The Army's Optionally Manned Fighting Vehicle (OMFV) Program: Background and Issues for Congress, Congressional Research Service Report for Members and Committees of Congress*, updated July 13, 2020, <https://fas.org/sgp/crs/weapons/R45519.pdf>
  10. An Assessment of U.S. Military Power. In: *The Heritage Foundation* 2021, pp. 337–354 [https://www.heritage.org/sites/default/files/2020-11/2021\\_IndexOfUSMilitaryStrength\\_ASSESSMENT\\_POWER\\_ALL.pdf](https://www.heritage.org/sites/default/files/2020-11/2021_IndexOfUSMilitaryStrength_ASSESSMENT_POWER_ALL.pdf)
  11. Reddy, Mutra Rajasekhara, and J. Srinivas. Vibration analysis of a support excited rotor system with hydrodynamic journal bearings. *Procedia Engineering* 144 (2016): 825–832.
  12. Han, Qinkai, and Fulei Chu. Parametric instability of flexible rotor-bearing system under time-periodic base angular motions. *Applied Mathematical Modelling*, 39, no. 15 (2015): 4511–4522.
  13. Avramov, K., M. Shulzhenko, O. Borysiuk, Christophe Pierre. Influence of periodic excitation on self-sustained vibrations of one disk rotors in arbitrary length journals bearings. *International journal of non-linear mechanics*. 77 (2015): 274–280.
  14. Cha, Matthew, Sergei Glavatskih. Nonlinear dynamic behaviour of vertical and horizontal rotors in compliant liner tilting pad journal bearings: Some design considerations. *Tribology International*. 82 (2015): 142–152.
  15. Martynenko, G. Resonance mode detuning in rotor systems employing active and passive magnetic bearings with controlled stiffness. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 13 (2016): 3293.
  16. Azraai, M. R., G. Priyandoko, A. R. Yusoff, and M. F. F. A. Rashid. Parametric Optimization of magneto-rheological fluid damper using particle swarm optimization. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 11 (2015): 2591.
  17. Ran, S., Hu, Y., Wu, H., & Cheng, X. (2018). Resonance Vibration Control for AMB Flexible Rotor System Based on  $\mu$ -Synthesis Controller. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–16.
  18. Zhang, Yipeng, Lidong He, Jianjiang Yang, Fangteng Wan, and Jinji Gao. Vibration Control of an Unbalanced Single-Side Cantilevered Rotor System with a Novel Integral Squeeze Film Bearing Damper. *Applied Sciences* 9, no. 20 (2019): 4371.
  19. Deng, Huaxia, YifanDiao, Jin Zhang, Peng Zhang, Mengchao Ma, Xiang Zhong, and Liandong Yu. Three-dimensional identification for unbalanced mass of rotor systems in operation. *Applied Sciences*. 8, no. 2 (2018): 173.
  20. Tkachuk M. M., Grabovskiy A., Tkachuk M. A., Zarubina A., Lipeyko A. Analysis of elastic supports and rotor flexibility for dynamics of a cantilever impeller. *Journal of Physics: Conference Series*. 1741 (2021). 012043 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012043>
  21. Tkachuk, M., Grabovskiy, A., & Tkachuk, A. Numerical and analytical analysis methods for radial response of flexible ring dampers. *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering: Proceedings of KOD 2021. Volume 109 of Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2022
  22. Tkachuk, M., Shut, O., Marchenko, A., Grabovskiy, A., Lipeyko, A., Polyvianchuk, A., Gritsuk, I., Tkachuk, M. Strength and stability criteria limiting geo-metrical dimensions of a cantilever impeller. *SAE Technical Paper. SAE International*, 2021, pp. 2021-01-5056
  23. Marchenko A., Grabovskiy A., Tkachuk M., Shut O. Detuning of a supercharger rotor from critical rotational velocities. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 137–145

Надійшло (received) 12.01.2022

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola A.)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувачий кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org)

**Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: [andrej8383@gmail.com](mailto:andrej8383@gmail.com)

**Ткачук Микола Миколайович (Ткачук Николай Николаевич, Tkachuk Mykola M.)** – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології та системи колісних і гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; тел.: (057)7076902; e-mail: [m.tkachuk@tmm-sapr.org](mailto:m.tkachuk@tmm-sapr.org)

**Клочков Ілля Євгенович (Клочков Илья Евгеньевич, Klochkov Illia)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; e-mail: [s008@tmm-sapr.org](mailto:s008@tmm-sapr.org)

**Прокопенко Микола Вікторович (Прокопенко Николай Викторович, Prokopenko Mykola)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: [kola0123@ukr.net](mailto:kola0123@ukr.net)

**Третьяк Владислав Володимирович (Третьяк Владислав Владимирович, Tretyak Vladeslav)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент гр. МІТ-219м, м. Харків, Україна; e-mail: [vldeslav2205@gmail.com](mailto:vldeslav2205@gmail.com)

**Волошина Ірина Олександрівна (Волошина Ирина Александровна, Voloshyna Iryna)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка гр. МІТ-218м, м. Харків, Україна; e-mail: [s1802@tmm-sapr.org](mailto:s1802@tmm-sapr.org)