

чітку кореляційну залежність. На цьому етапі в якості керуючого впливу вибирають контроль кількості технологічної води, що додається до технологічних механізмів.

Розроблена модель системи управління даної секції збагачення залізної руди забезпечує візуалізацію цього процесу проектування та моніторинг його основних параметрів для вимірювання та визначення умов для подальшої розробки моделі.

Вдосконалення моделі автоматизованої системи керування є напрямком подальших досліджень моделювання контрольованих параметрів та керуючих ефектів процесів збагачення.

### Список літератури

1. **Morkun V.** Optimization of the second and third stages of grinding based on fuzzy control algorithms / V. Morkun, O. Savitskyi, M. Tymoshenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №8. – P. 22–25.
2. **Кондратець В.О.** Обґрунтування системи комп'ютерної ідентифікації та регулювання розрідження пульпи у кульових млинах з циркулюючим навантаженням / В.О. Кондратець, О.М. Сербул // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць.– 2013.– Вип. 34.– С.45-50
3. **Танатар А.И.** Элементы промышленной автоматизации и их динамические свойства / Танатар А.И.- К.: Техніка, 1975.- 232 с.
4. **Sbarbaro D.** Advanced control and supervision of mineral processing plants / D. Sbarbaro, R. del Villar., 2010. – 311 p.
5. **Кондратець В.О.** Ідентифікація розрідження пульпи у млині, що подрібнює піски класифікатора з додатковою рудою / В.О. Кондратець // Вестник Херсонского нац. техн. ун-та.- 2014.- №3 (50).- С.305-310.
6. **Бусленко Н.П.** Математическое моделирование производственных процессов на цифровых вычислительных машинах / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1984. – 362 с.
7. **Кочура Е.В.** Моделирование и оптимизация управления качеством железорудного концентрата / Е.В. Кочура, А.Н. Марюта, В.С. Голод // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1981. – №11. – С. 127-131
8. **Пупена О.М., Ельперін І.В.** Програмування промислових контролерів у середовищі Unity Pro: Навч. Посібник. – К.: Видавництво Ліра-К, 2013. – 376 с.
9. **John, Karl-Heinz** IEC 61131-3: programming industrial automation systems: concepts and programming languages, requirements for programming systems, aids to decision-making tools / Karl-Heinz John, Michael Tiegelkamp, p.cm Springer-Verlag Berlin Heidelberg – 2001, p. 350.
10. **Morkun V.** Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №7. – P. 16–19.
11. **Petruzella, Frank D.** Programmable logic controllers / Franf D. Petruzella. – 4<sup>th</sup> ed. 2011, 396 p.
12. **Деменков Н.П.** нечеткое управление в технических системах: Учеб. Пособие / Н.П. Деменков; М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.
13. **Bolton W.** Programmable logic controllers. Fourth edition / W. Bolton, 290 p.
14. **Bryan, L.A.** Programmable controllers: theory and implementation / L.A. Bryan, F.A. Bryan.-2<sup>nd</sup> ed. p. cm. 1047.
15. **Хан Г. А.** Автоматизация обогатительных фабрик / Г. А. Хан, В. П. Картушин, Л. В. Сорокер, Д. А. Скрипчак. – М. : Недра, 1974. – 280 с.

Рукопис подано до редакції 12.11.2019

УДК 62-233.3

О.А. ГУЛІВЕЦЬ, канд. техн. наук, доц., А.О. БОНДАРЕЦЬ, ст. викладач,  
С.Ю. ОЛІЙНИК, асистент  
Криворізький національний університет

## ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДЕМПФУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ЗАЧЕПЛЕННІ КОЛІС ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

**Мета.** Метою даної роботи є створення високоефективного та надійного в роботі пристрою для зменшення динамічних навантажень у зачепленні коліс зубчастих передач.

**Методи.** Для досягнення поставленої мети застосовано метод конструкційного демпфування коливань навантаження зубчастої передачі на основі використання пружних елементів, які установлені між зубчастим колесом та півмуфтою.

**Наукова новизна.** На основі виконаних досліджень розроблено оригінальний метод конструкційного демпфування динамічних навантажень у зачепленні коліс зубчастих передач.

**Практична значимість.** Використання розробленого пристрою в приводах механізмів і машин, де виникають короткочасні значні перенавантаження, які залежать від режиму роботи двигуна та виконуючого механізму, дозволить суттєво зменшувати динамічні навантаження в зачепленні коліс зубчастих передачах, спрощувати їх виготовлення, монтаж та демонтаж.

**Результати.** Зубчасті передачі у приводах ряду механізмів внаслідок особливостей їх робочого процесу зазнають значних короткочасних перевантажень, які суттєво впливають на довговічність їх роботи. Тому розробка пристроїв для зменшення динамічних навантажень в зачепленні коліс передач є актуальною науково-практичною зада-

чею. В даній роботі на основі аналізу існуючих конструкцій пружних зубчастих передач сформульовані вимоги до конструкцій пристроїв, призначених для зменшення динамічних навантажень в зачепленні коліс зубчастих передач. Цим вимогам в найбільш повній мірі відповідає запропонований пристрій для демпфування динамічних навантажень у зачепленні зубчастих коліс передач. Запропонований пристрій складається з зубчастого колеса та півмуфти, які з'єднані пружними елементами. Зубчасте колесо з метою надійного центрування його вінця в радіальному та осьовому напрямі встановлене на валу посередньо через два радіально-упорні підшипники, а півмуфта нерухомо з'єднана з валом. Установка пружних елементів, якими з'єднується зубчасте колесо з півмуфтою, виконана так, щоб забезпечувалось їх одночасне навантаження при передаванні обертального моменту в обидва боки обертання. Пружні елементи гумові, а їх робочі поверхні армовані металічними пластинками з відігнутими назвні краями. З метою запобігання появи резонансу крутих коливань пружні елементи виконані зі змінним поперечним перерізом.

**Ключові слова:** зубчасте колесо, зубчаста передача, динамічні навантаження, демпфування, пружні елементи, коливання.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-121-127

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** В сучасному машинобудуванні широко застосовуються механічні передачі, які передають механічний рух від двигуна до робочого органу машини. Виробництво механічних передач є одним із самих масових і є другим у світі за обсягом продукції, що реалізується (більше 70 млрд. доларів США) [1]. Серед механічних передач найбільше застосування мають зубчасті передачі.

Похибки при виготовленні деталей і їх монтажі та деформації під дією робочих навантажень, а також перевантаження, які залежать від режиму роботи двигуна та режиму технологічного процесу, що виконується робочим органом, є причиною динамічних навантажень в зачепленні зубчастих передач. Динамічні навантаження в зачепленні приводять до збільшення контактних та згинальних напружень в зубцях коліс, які зменшують їх довговічність.

Отже, розробка методів зменшення динамічних навантажень в зачепленні зубчастих передач є актуальною науково-практичною задачею.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Дослідженню динаміки зубчастих передач і розробці методів зменшення динамічних навантажень в зачепленні зубчастих передач присвячена велика кількість робіт вітчизняних та зарубіжних дослідників: Е. Бакінгема, А.І. Петрусевича, Н.Д. Генкіна, В.К. Гринкевича, В.А. Доллежала, Б.М. Абрамова, М.С. Полоцького, М.В. Скрабелінського, І.Ш. Давидова, М.А. Ковальова, Х. Мерріта, М. Боша та багатьох інших.

Найбільш глибокі дослідження динаміки зубчастих передач проводилися в ЦНИИТМАШ, в інституті машинознавства та в ряді науково-дослідних інститутів.

Було розроблено ряд математичних моделей динаміки зубчастих передач та конструкцій пристроїв, призначених для зменшення динамічних навантажень у зачепленні зубчастих коліс. На основі виконаних досліджень були встановлені залежності, в яких вплив похибок кроку і профілю зубців та їх колової швидкості на динамічні навантаження в зачепленні враховуються коефіцієнтом динамічності навантаження  $K_d$  при перевірних розрахунках зубців коліс на втому.

Короточасні перевантаження, які залежать від режиму роботи двигуна та виконуючого органу машини, суттєво впливають на величину динамічних навантажень у зачепленні коліс (табл. 1) [2].

Таблиця 1

Коефіцієнти динамічних навантажень у приводах механізмів машин

Вид робочої машини та умови експлуатації	Коефіцієнт динамічного навантаження
Приводи з асинхронним двигуном при пуску	2,5...5,0
Головний привод токарних верстатів з асинхронним електродвигуном	1,8...4,0
Лебідки, стругальні та довальні верстати, скребкові конвеєри, фрикційні преси	1,5...2,5
Вантажопіднімальні машини:	
механізми піднімання	1,2...2,0
механізми пересування	1,5...4,0
Вентилятори, повітродувки	1,4...1,8
Електричний транспорт	1,6...2,5
Дробарки каміння	2,0...3,5
Млини, глином'ялки, змішувачі в'язких мас	1,8...2,2
Кривошипно-повзунні та ексцентрикові механізми	1,8...3,0
Прокатні стани (удари при захваті)	2,5...6,0

При нечастих короткочасних перевантаженнях для запобігання втрат статичної міцності за відомими формулами виконують перевірку зубчастих передач на міцність. Але при частих короткочасних перевантаженнях вони можуть суттєво вплинути на експлуатаційну довговічність зубчастої передачі. Тому в таких випадках необхідно зменшувати величину перевантажень.

Найбільш ефективним способом зменшення динамічних навантажень, які залежать від режиму роботи двигуна та робочого органу машини, є демпфування.

Для зменшення динамічних навантажень в зачепленні зубчастих передач було розроблено ряд зубчастих коліс складеної конструкції, в яких збільшена колова податливість зубчастого вінця колеса відносно його маточини за рахунок розміщення між ними пружних елементів (пружини стискання, гумових пружних елементів та інших).

На рис. 1а [3] показана одна із існуючих конструкцій пружного зубчастого колеса для демпфування крутильних коливань на швидкісних ступенях гелікоптера, в якому висока колова податливість досягається за рахунок пружного з'єднання його обода 1 з маточиною 2 через ряд пружин 3. Для запобігання перекошуванню пружини установлені на циліндричних шарнірних сухарях 4, які упираються в дно гнізд обода і маточини. Як наслідок такої конструкції є те, що для передачі обертового моменту в ній приймає участь лише половина пружин.

Суттєвим недоліком конструкцій, наведених на рис. 1а та 1б є те, що при центруванні обода відносно маточини накладними кришками не можна зубчастий вінець виконувати косозубим, так як при цьому буде виникати в зачепленні коліс осьова сила яка навантажуватиме центруючий елемент.

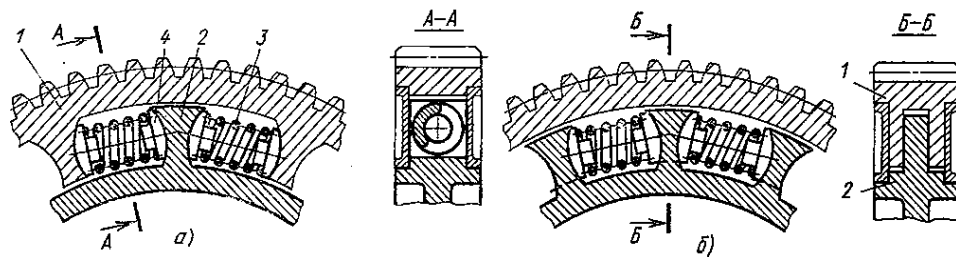


Рис. 1. Способи конструктивного демпфування динамічних навантажень

Крім цього в цих конструкціях для зменшення спрацювання тертьових поверхонь, по яким проходить центрування, необхідно передбачати змащення.

В іншій конструкції (див. рис. 1б) виступи в радіальному напрямі маточини 2 введені в паз обода. Дякуючи цьому всі пружини приймають участь у демпфуванні коливань навантаження. Такі конструкції використовують в редукторах тепловозів та інших машин, в яких необхідно зменшувати динамічні навантаження в періоди пуску.

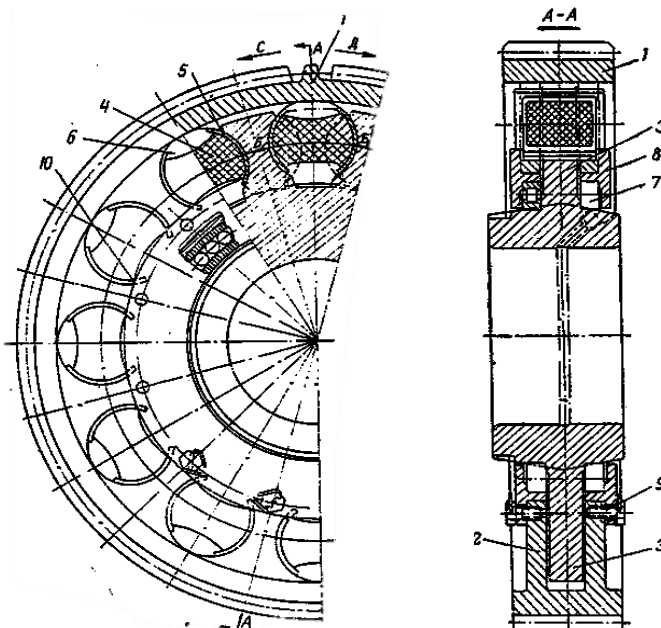


Рис. 2. Пружне зубчасте колесо для тягової передачі локомотива

В конструкції зубчастого колеса (рис. 2) [4] пружні елементи 4 виконані гумовими з армуванням металічними сегментами 5. Для центрування зубчастого обода 1 відносно маточини 3 застосовано радіальний роликпідшипник 7, а для центрування в осьовому напрямі з обох боків на вертикальних стінках 2 зубчастого вінця 1 закріплені кришки 8. В даній конструкції як і в конструкціях, показаних на рис. 1, зубчастий вінець не може бути виконаний косозубим.

В конструкції, що наведена на рис. 3 [5], центрування обода зубчастого колеса 1 відносно маточини 5 здійснюється двостороннім кульковим підшипником, що складається з кульок які насипані і запо-

вноють бігову доріжку, утворену фланцями, що закріплені болтовим з'єднанням на маточині, і диском зубчастого вінця. Така конструкція дозволяє сприймати певне осьове навантаження, але є досить складною у виготовленні, монтажі та обслуговуванні.

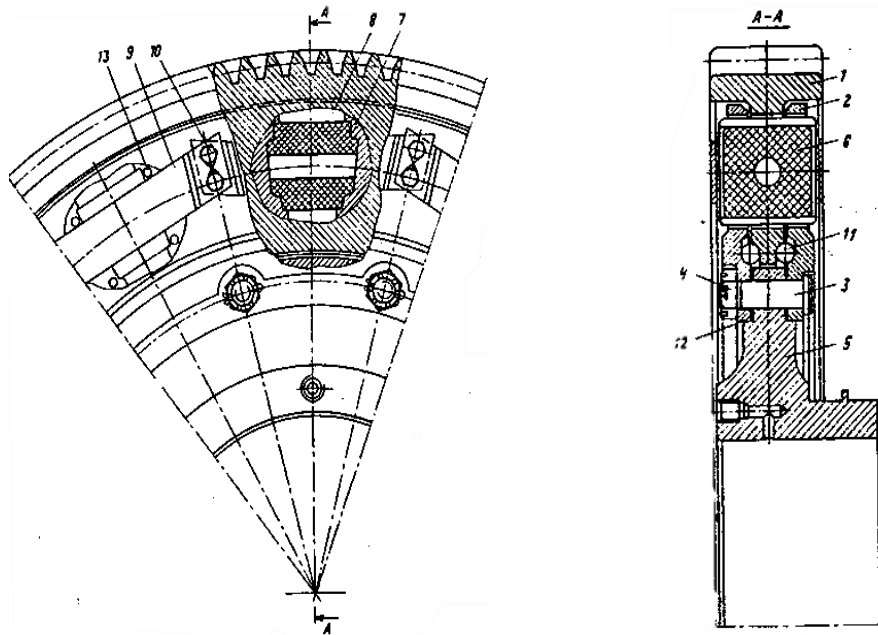


Рис. 3. Пружне зубчасте колесо

На рис. 4 показано конструкцію зубчастого колеса тепловоза 2ТЭ116 [6]. Зубчасте колесо, як і в попередніх випадках, має складену конструкцію. Зубчасте колесо складається з прямокутного зубчастого вінця 6, який через пружні елементи 1 і 2 за допомогою тарілок 19, призонних втулок 4, болтів 11 і гайок 3 з'єднаний з маточиною 20, яка насаджена з натягом на вісь колісної пари тепловоза. Пружні елементи з метою одержування нелінійної характеристики тангенціальної жорсткості зубчастого колеса виконані різної жорсткості двох типів. Вісім пружних елементів 1 (малої жорсткості) складаються з пальця 22 на зовнішню профільну поверхню якого насажені гумові амортизатори 24 і 23, які попередньо вставлені в металічні втулки 5, 7, 8. Втулки 5 і 7 виконані з буртами, які запобігають односторонньому вільному осьовому переміщенню по них вінця.

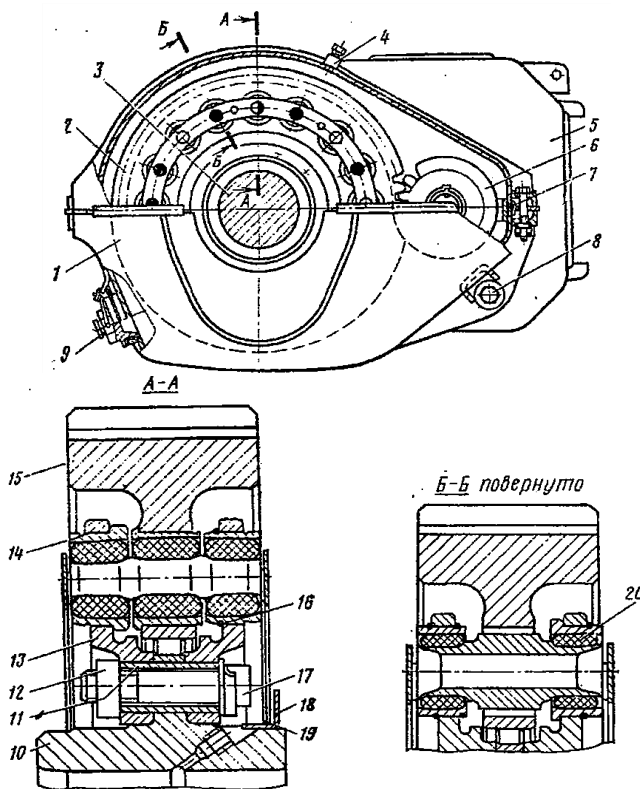


Рис. 4. Пружне зубчасте колесо тягового редуктора тепловоза 2ТЭ116

Тому сформовані пружні елементи 1 установлені на колесі по чотири на кожному боці зубчастого вінця. Пружні елементи в тарілках і в вінці закріплені стопорними кільцями 21.

Вісім інших пружних елементів 2 (великої жорсткості) також складаються з профільного пальця 15 на кінці якого напресовані гумові амортизатори 17, які попередньо вставлені в металічні втулки 16 і 18. Для запобігання сповзанню втулка 16 має обмежувальний борт і проточ-

ку, а втулка 18 – дві проточки для установки стопорних пружних кілець 21.

Між зубчастим вінцем і маточиною установлюють без сепаратора 90 роликів 10, які забезпечують відносне повертання вінця і маточини через тіла кочення, жорстку їх центровку і розвантаження пружних елементів від радіальних зусиль в зубчастому зачепленні тягової передачі.

Для можливості самоустановки зубчастого вінця поверхня маточини під роликами виконана сферичним радіусом, а пружні елементи сформовані з зазором між обмежувальними буртами втулок.

Передача обертального моменту в такій конструкції відбувається в два етапи: спочатку при малому обертальному моменті навантажуються пружні елементи 1, які мають меншу жорсткість, а потім при збільшенні обертального моменту (при початку руху) вінець повертається і в роботу вступають і більш жорсткі елементи. Внаслідок цього забезпечується необхідна нелінійна характеристика тангенціальної жорсткості пружного зубчастого колеса.

Як установлено практикою, застосування в тяговому редукторі тепловоза 2ТЭ116 такого пружного зубчастого колеса дозволило значно ( $\approx$  в 3 рази) зменшити динамічні навантаження, які виникають в зачепленні зубчастої передачі. Однак конструкція пружного зубчастого колеса, яка застосована в тяговому редукторі тепловоза 2ТЭ116 є досить складною у виготовленні і монтажі, а також не дозволяє застосовувати косозубу передачу, яка характеризується плавністю роботи, внаслідок чого зменшується шум та додаткові динамічні навантаження.

Зубчасті колеса [7-9], мають аналогічні конструкції, які відрізняються одна від іншої конструкцією пружних елементів і мають такі самі основні недоліки.

Останнім часом для зменшення чутливості до неточності виготовлення та монтажу, хорошого припрацювання та зменшення шуму при роботі передачі почали застосовувати зубчасті колеса, які виготовлені з неметалічних матеріалів. Як правило, вони працюють у парі із сталевими зубчастими колесами. Але, як свідчить практика застосування таких коліс, вони суттєво поступаються металевим за несучою здатністю та довговічністю (циклічна зміна нормальних напружень у тілі коліс приводить до появи тріщин у впадинах зубців, які швидко розвиваються в радіальному напрямі до маточини). Тому такі колеса доцільно застосовувати лише у малонавантажених передачах [10].

**Постановка задачі.** На основі аналізу конструкційних рішень зубчастих коліс, спрямованих на зменшення динамічних навантажень у зачепленні зубчастої передачі розробити конструкцію зубчастого колеса, яка б дозволяла ефективно зменшувати динамічні навантаження у зачепленні зубчастої передачі, відповідала б вимогам надійного центрування обода зубчастого колеса в радіальному та осьовому напрямках, дозволяла б виконувати зубчастий вінець з косими зубцями, була б нескладною у виготовленні, монтажі і демонтажі та забезпечувала велику експлуатаційну надійність.

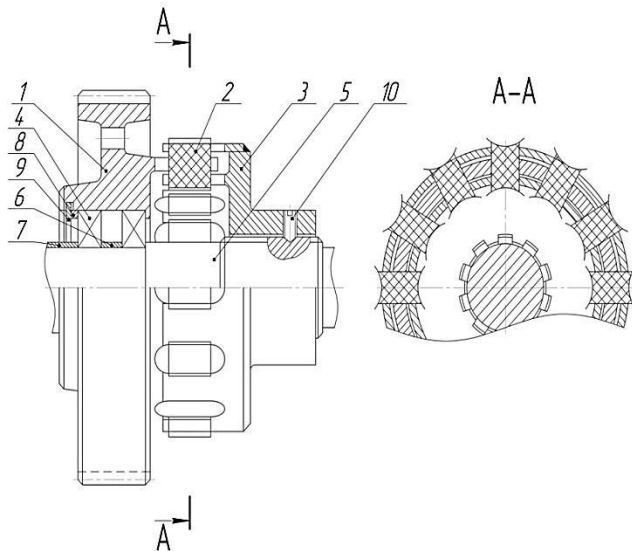
**Викладення матеріалу та результати.** На основі аналізу існуючих конструкцій пружних зубчастих передач та їх робочих процесів сформульовані вимоги до конструкцій пристроїв, призначених для зменшення динамічних навантажень в зачепленні коліс передач:

- ефективно демпфувати динамічні навантаження у зачепленні зубчастих коліс;
- надійно центрувати зубчастий вінець в радіальному та осьовому напрямках;
- дозволяти застосовувати в передачах колеса з косими зубцями;
- бути нескладними у виготовленні, монтажі та демонтажі;
- забезпечувати високу експлуатаційну надійність.

В найбільшій мірі цим вимогам відповідає запропонований пристрій для демпфування динамічних навантажень у зачепленні зубчастої передачі, який зображено на рис. 5.

Запропонований пристрій складається із зубчастого колеса 1, пружних елементів 2 та півмуфти 3. Зубчасте колесо з метою надійного його центрування в радіальному та осьовому напрямі і зачеплення необхідної крутильної податливості при дії сил в зачепленні коліс установлене на валу 5 посередньо через два радіально-упорні підшипники 4. Півмуфта 3 за допомогою роз'ємного з'єднання і установочного гвинта 10 закріплена на валу 4 нерухомо.

Зубчасте колесо обладнане одностороннім виступом у вигляді співвісної циліндричної оболонки, а півмуфта – двома односторонніми співвісними оболонками з різними діаметрами



**Рис. 5.** Пристрій для демпфування динамічних навантажень у зачепленні коліс зубчастих передач: 1 – зубчасте колесо; 2 – пружний елемент; 3 – пів муфта; 4 – радіально-упорний підшипник; 5 – вал; 6 – втулка; 7 – втулка; 8 – шайба; 9 – кільце пружне стопорне; 10 – гвинт установочний

ляє запобігати появі резонансу крутильних коливань [10].

Розміри пружних елементів і всіх деталей пристрою визначаються при розрахунках зубчастої передачі конкретного привода.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Розроблено конструкцію пристрою, який забезпечує надійне центрування зубчастого вінця колеса в радіальному та осьовому напрямках, що дозволяє ефективно застосовувати його у косозубих передачах, спрощує їх виготовлення, монтаж та демонтаж.

В подальшому доцільно виготовити експлуатаційний зразок запропонованого пристрою та провести його дослідження в промислових умовах.

#### Список літератури

1. Гольдфарб В.И. Тенденции развития рынка производства и потребления зубчатых передач / В.И. Гольдфарб, В.И. Некрасов, Л.А. Ширманова // Теория и практика зубчатых передач: Сб. докл. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Ижевск, 2004. – с. 5-11.
2. Иванов М.Н. Детали машин. Учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 5-е изд., перераб. – М.: Высшая шк., 1991. – 383 с.
3. Иосилевич Г.Б. Детали машин. Учебник для студентов машиностроит. спец. вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
4. А.с. 249415 (СССР). Упругое зубчатое колесо для тяговой передачи локомотива / Беган-Богацкий П.З., Ряховский Н.С., Добрынин Л.К.
5. А.с. 702201 (СССР). Упругое зубчатое колесо / Беляев А.И., Иванов В.Н., Никифоров Б.Д., Родова Л.И., Яров Н.С.
6. Тепловоз 2ТЭ116 – руководство по устройству и обслуживанию / С.П. Филимонов, А.И. Гибалов, В.Е. Быковский и др. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1985. – 328 с.
7. А.с. 632867 (СССР). Зубчатое колесо с упругим соединением венца и ступицы / С.Г. Калинин, В.Н. Марченко.
8. А.с. 973992 (СССР). Составное зубчатое колесо / Н.Н. Патлань, В.Г. Просницкий, Р.М. Олин.
9. А.с. 1649191 (СССР). Составное зубчатое колесо / Г.К. Войтехович, В.Л. Басинюк.
10. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунків деталей машин: Підруч. – 2-е вид. перероб. – Львів: Афіша, 2003. – 560 с.

Рукопис подано до редакції 18.11.2019

їх середньої поверхні. В циліндричний простір між співвісними циліндричними оболонками півмуфти входить співвісна циліндрична оболонка зубчастого колеса. В співвісних циліндричних оболонках зубчастого колеса та півмуфти виконані паралельно їх осі наскрізні пази з виходом на вільні їх торці. В ці пази з попереднім натягом установлені пружні елементи 2, внаслідок чого забезпечується одночасне навантаження всіх пружних елементів при передаванні обертового моменту в обидва боки обертання.

Пружні елементи 2 гумові, а їх робочі поверхні армовані металічними пластинками, краї яких для забезпечення надійного кріплення відігнуті назовні.

Для забезпечення нелінійної характеристики тангенціальної жорсткості даного пристрою пружні елементи виконані зі змінним поперечним перерізом, що дозво-