

Н. П. Ісмаїлова, І. С. Мікрюков, Л. Г. Бикова

ТЕХНІЧНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ СПРЯЖЕНИХ ЗУБЧАСТИХ ЗАЧЕПЛЕНЬ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ В ОЗБРОЄННІ ТА ВІЙСЬКОВІЙ ТЕХНІЦІ

У складних реаліях сучасної промисловості України важливим напрямком науково-технічного розвитку є оптимізація технічних рішень для проєктування спряжених зубчастих зачеплень кінематичних пар щодо визначення інтерференції в озброєнні та військовій техніці з підвищеними вимогами до ступеня складності виробів, що проєктуються, і скорочення термінів виконання замовлень. Вплив кризових явищ в економіці та посилення конкурентної боротьби на ринку зумовлюють потребу в розробленні виробів на найсучаснішому технічному рівні.

У статті запропоновано оптимізацію аналітичного технічного рішення для проєктування лінії контакту між осями спряжених зубчастих зачеплень кінематичних пар для визначення інтерференції. Це дозволить у ході проєктування спряжених поверхонь зубчастих зачеплень привести рівняння до параметричної форми, алгоритмізувати та оптимізувати моделювання виробів в озброєнні та військовій техніці, а також спроектувати контактну поверхню зачеплення.

Технічне вирішення порушеної проблеми належить до зубчастих спряжених механізмів зовнішнього зачеплення, форма зубів коліс яких утворюється огинанням початкового контуру зубчастої рейки, а кількість зубів визначається залежно від призначення механізму, необхідного передавального відношення та діаметральних розмірів. Такі механізми використовуються в різних вузлах й агрегатах озброєння та військової техніки, а саме у вигляді зубчастих коліс редукторів, лебідок, планетарних і хвильових передач та як робочі органи насосів, гідродвигунів, компресорів і двигунів внутрішнього згорання з прямими та гвинтовими зубами. Щоб уникнути інтерференції, на стадії проєктування необхідно проаналізувати технічні криволінійні характеристики спряжених поверхонь. Застосування технічних рішень для опису реальних поверхонь, одержуваних в результаті створення криволінійної моделі, відображає реальний фізичний процес із визначення інтерференції.

Ключові слова: *проєктування; кінематична пара; моделювання; інтерференція; оптимізація; зубчасте зачеплення; спряжена поверхня; технічне рішення; моделювання; параметризація; контактна лінія зачеплення.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сьогодні в умовах складної економічної ситуації в сучасному воєнно-промисловому комплексі України, зумовленої воєнним станом, особливої значущості набуває проєктування виробів для озброєння та військової техніки. Зокрема оптимізації потребує технічне рішення щодо підвищення точності проєктування спряжених зубчастих зачеплень за умови відсутності інтерференції. Для розв'язання порушеної проблеми необхідно передусім дослідити

явища інтерференції в проектуванні спряжених зубчастих зачеплень кінематичних пар, а також перетворення вихідної криволінійної контактної поверхні між профілями зубів [1], що, у свою чергу, дозволить виключити інтерференцію ще на стадії розроблення деталей для озброєння та військової техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання, пов'язані з інтерференцією, виникли з практики [2], тому їх вирішення має велику практичну цінність. Крім того, вони збагачують теорію спряжених зубчастих зачеплень, яка не мислима без своїх великих додатків. У дослідженні [3] надано нове визначення поняття інтерференції, а саме стверджується, що інтерференцією називається будь-який неправильний контакт профілів поза активними ділянками лінії зачеплення, тобто це явище, коли траєкторія кромки одного зуба у відносному русі перетинає профіль спряженого зуба. У ході вивчення технічних рішень у проектуванні спряжених зубчастих механізмів кінематичних пар було встановлено [4], що відомі методи та способи мають певні складнощі в практичному застосуванні на виробництві й потребують високої кваліфікації виконавців [5]. Проте щодо інтерференції передбачалася побудова великої кількості аксоїдів [6], що робить відповідні дослідження недоцільними в практичному використанні [7]. У [8] проаналізовано переваги й недоліки найбільш поширених на практиці типів кінематичних пар зубчастих спряжених передач. Що стосується технічних рішень і можливостей у їх проектуванні, то, як показано в працях [9, 10], на сучасному етапі розроблення контактної поверхні між профілями зубів, що визначає інтерференцію, є актуальним.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є оптимізація аналітичного технічного рішення щодо визначення контактної поверхні зачеплення спряжених кінематичних пар, що виключають інтерференцію. Це дозволить із високою точністю визначати інтерференцію ще на стадії проектування та моделювання спряжених кінематичних пар зубчастих передач у військовій техніці та озброєнні.

Виклад основного матеріалу. Детально розглянемо аналітичне подання вимог, коли вектор \bar{l} є напрямним вектором нормалі до кривої K . У такому разі достатньо, щоб скалярний добуток вектора \bar{l} на вектор \bar{T} дорівнював нулю:

$$\bar{l} \cdot \bar{T} = 0. \quad (1)$$

Підставляючи в (1) формули, отримуємо:

$$(\bar{l}_t + \bar{n}l_n) \cdot \bar{l} \cdot \left(1 + \frac{dl_t}{dS} - \frac{l_n}{g}\right) + (\bar{l}_t + \bar{n}l_n) \cdot \bar{n} \cdot \left(\frac{dl_t}{dS} - \frac{l_t}{g}\right) = l_t + l_t \frac{dl_t}{dS} + l_n \frac{dl_n}{dS} = 0.$$

Якщо $l_t = l \cos \alpha$, $l_n = l \sin \alpha$, то попередня рівність набуде такого вигляду:

$$l \left(\cos \alpha + \cos \alpha (l \cos \alpha)'_s + \sin \alpha (l \sin \alpha)'_s \right) = 0. \quad (2)$$

Рівняння (2) виконується за $l = 0$, що добре узгоджується з концепцією векторного обчислення та свідчить про довільність напрямку нульового вектора [2]. Оскільки напрям

нульового вектора довільний, то останній можна вважати ортогональним до будь-якого вектора, зокрема й \bar{T} . Вираз у дужках у (2) можна значно спростити, урахувавши, що $S = R\varphi$, де R – радіус центроїди деталі, і продиференціювавши складну функцію:

$$\left(\cos \alpha + \cos \alpha (l \cos \alpha)'_s + \sin \alpha (l \sin \alpha)'_s \right) = \cos \alpha + \frac{1}{R} (l \cos \alpha)'_\varphi \cos \alpha + \frac{1}{R} (l \sin \alpha)'_\varphi \sin \alpha = 0.$$

Підвівши до спільного знаменника й урахувавши, що $R \neq 0$, отримаємо

$$R \cos \alpha + (l \cos \alpha)'_s \cos \alpha + (l \sin \alpha)'_s \sin \alpha = 0.$$

Виконавши операцію диференціювання, маємо

$$R \cos \alpha + \left(l'_\varphi \cos \alpha - l \sin \alpha \cdot \alpha'_\varphi \right) \cos \alpha + \left(l'_\varphi \sin \alpha + l \cos \alpha \cdot \alpha'_\varphi \right)'_s \sin \alpha = 0.$$

Розкривши дужки та скоротивши подібні члени рівняння, отримали

$$l'_\varphi + R \cos \alpha = 0. \tag{3}$$

Рівність (3) або $l = 0$ є необхідною умовою того, що $\bar{l} \cdot \bar{T} = 0$. Якщо виконати всі обчислення у зворотному порядку, то прийдемо до рівності $\bar{l} \cdot \bar{T} = 0$. У такому разі рівність (3) або $l = 0$ є необхідною і достатньою умовою того, що вектор \bar{l} є напрямним вектором нормалі до кривої K .

Назвемо центральною точкою профілю K точку нормалі, у якій через центр центроїди C проходить точка O (рис. 1).

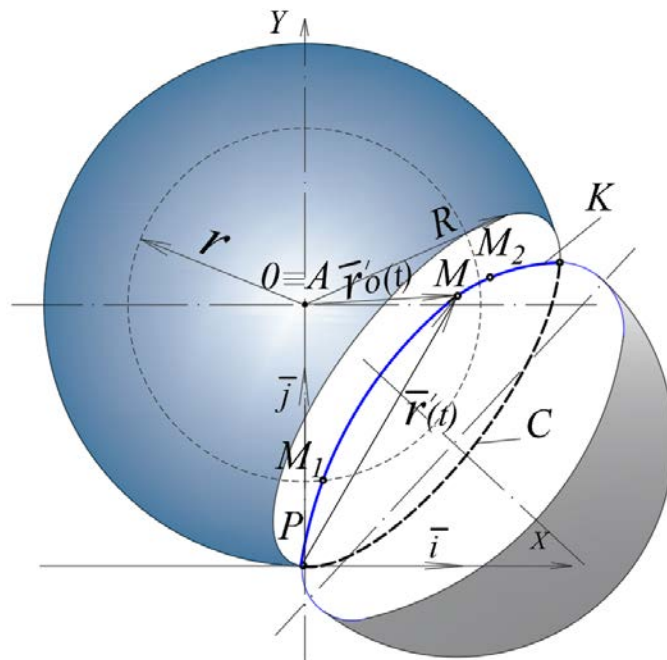


Рис. 1. Коло із центром у центрі центроїди

На практиці найчастіше використовують такі профілі, у яких коло із центром у центрі центроїди перетинає їх двічі (див. рис. 1), це точки M_1 і M_2 [3]. Доведемо, що у таких профілях завжди є центральна точка.

Профіль заданий рівняннями в параметричному вигляді:

$$x = x(t),$$

$$y = y(t),$$

де t – деякий параметр.

$$\text{Тоді } \bar{r}(t) = \bar{i}x(t) + \bar{j}y(t);$$

$$\bar{r}(t) = \bar{r}'(t) - \bar{j}R = \bar{i}x(t) + \bar{j}(y(t) - R).$$

Векторну функцію скалярного аргументу $\bar{r}(t)$ можна записати в такому вигляді:

$$\bar{r}(t) = r(t) \cdot \bar{r}_0(t), \tag{4}$$

де $r(t)$ – модуль вектора $\bar{r}(t)$;

$\bar{r}_0(t)$ – одиничний вектор вектора $\bar{r}(t)$.

Оскільки точки M_1 і M_2 належать одному колу, то $r(t_1) = r(t_2) = r$, де r – радіус кола, що проходить через точки M_1 і M_2 , t_1 і t_2 – значення параметрів, які відповідають точкам M_1 і M_2 .

Розглянемо функцію $r(t)$, вона скалярна, до неї застосовані теореми аналітичного аналізу. Звернемося до теореми Ролля, яка формулюється таким чином: якщо функція $f(x)$ неперервна на інтервалі (a, b) , має похідну в кожній точці всередині цього інтервалу, а значення функції на кінцях цього інтервалу рівні, тобто $f(a) = f(b)$, то всередині проміжку є значення $x = C$, за якого похідна звертається в нуль, тобто $f'(C) = 0$.

Оскільки крива K є гладкою, то функція $r(t)$ задовольняє теорему.

Отже, є значення t_0 ($t_1 \leq t \leq t_2$), у якому $\frac{dr}{dt} = 0$. Продиференціюємо (4) за t :

$$\frac{d\bar{r}}{dt} = \frac{dr}{dt} \bar{r}_0 + r \frac{d\bar{r}_0}{dt}.$$

Якщо $t = t_0$, то остання рівність набуде такого вигляду:

$$\left. \frac{d\bar{r}}{dt} \right|_{t=t_0} = r(t_0) \cdot \left. \frac{d\bar{r}_0}{dt} \right|_{t=t_0}. \tag{5}$$

Оскільки $\left. \frac{d\bar{r}}{dt} \right|_{t=t_0} = 0$, то вектор $\frac{d\bar{r}}{dt}$ є напрямним вектором дотичної і, як випливає з (3), у разі $t = t_0$ він колінеарний вектору $\frac{d\bar{r}_0}{dt}$. Через те, що вектор $\bar{r}_0(t)$ одиничний, $\frac{d\bar{r}_0}{dt}$ йому ортогональний [2], це означає, що $\bar{r}_0(t)$ ортогональний $\left. \frac{d\bar{r}}{dt} \right|_{t=t_0}$. Оскільки $\bar{r}_0(t)$ – вектор, що йде з точки O , а $\left. \frac{d\bar{r}}{dt} \right|_{t=t_0}$ спрямовує вектор дотичної до кривої K , то вектор $\bar{r}_0(t)$ є напрямним вектором нормалі до кривої K у точці, що відповідає $t = t_0$, і нормаль у цій точці проходить через центр центроїди C . Отже, теорема про наявність центральної точки на гладкому профілі доведена.

Також привертає увагу будова лінії зачеплення в точці, що відповідає центральній точці профілю. Оскільки вектор $\bar{r}_0(t)$ виходить із точки A , то пряма, яка проходить через O та має своїм напрямним вектором $\bar{r}_0(t)$, буде нормаллю не тільки до профілю, а й до центроїди (центроїда C – коло радіусом R із центром у точці O), тоді кут $\alpha = 0,5\pi$. У разі побудови лінії зачеплення точка, що відповідає центральній, належатиме осі y . Розглянемо напрямком дотичної до лінії зачеплення в цій точці. Відповідно до рівняння (5) напрямний вектор дотичної до лінії зачеплення з урахуванням того, що $S = R\varphi$, буде таким:

$$\bar{T}_n = \bar{t}(l)'_{\varphi} \frac{1}{R} + \bar{n}(l_n)'_{\varphi} \frac{1}{R}$$

або

$$\bar{T}_n = \bar{t}(l \cos \alpha)'_{\varphi} \frac{1}{R} + \bar{n}(l \sin \alpha)'_{\varphi} \frac{1}{R}.$$

Якщо лінію зачеплення будувати в точці P (рис. 1), то замість \bar{t} і \bar{n} братимемо \bar{i} та \bar{j} . Крім того, якщо ввести вектор $\bar{T}'_n = \bar{T}_n R$, то формула для напрямного вектора дотичної до лінії зачеплення набуде такого вигляду:

$$\bar{T}'_n = \bar{i}(\cos \alpha)'_{\varphi} + \bar{j}(l \sin \alpha)'_{\varphi}. \quad (6)$$

Оскільки

$$(l \cos \alpha)'_{\varphi} = l'_{\varphi} \cos \alpha - l \sin \alpha \cdot \alpha'_{\varphi}, \quad (l \sin \alpha)'_{\varphi} = l'_{\varphi} \sin \alpha + l \cos \alpha \cdot \alpha'_{\varphi},$$

то, враховуючи те, що $\cos(0,5\pi) = 0$, отримуємо із (6) у точці $t = t_0$

$$\bar{T}'_n = \bar{i}(-l \cdot \alpha'_{\varphi}) + \bar{j}(0). \quad (7)$$

Із наведеного вище виразу (7) маємо, що дотична до лінії зачеплення в точці, яка відповідає центральній, перпендикулярна осі y (паралельна осі x). Якщо $\alpha'_\varphi = 0$, то напрямок вектора \overline{T}'_n стає невизначеним. Для знаходження кута нахилу дотичної можна скористатися правилом Лопіталія:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(l \sin \alpha)'_\varphi}{(l \sin \alpha)'_\varphi}.$$

У такий спосіб приходимо до висновку, що і в цьому разі дотична перпендикулярна за віссю y . За цих умов можна навести і більш наочні міркування. Продиференціюємо вираз (2) за φ :

$$l''_\varphi = R \sin \alpha \frac{d\alpha}{d\varphi}.$$

Звідси випливає, що $\left. \frac{d\bar{r}}{dt} \right|_{t=t_0}$, тобто $\alpha'_\varphi = 0$, коли $l''_\varphi = 0$. З точністю до нескінченно малого третього порядку крива може бути подана дотичним колом. У зв'язку із цим ми можемо стверджувати, що центральна точка не є особливою (профіль деталі взагалі не містить особливих точок). Тоді можна розглядати три основні варіанти: перший, коли дуга кривої поблизу центральної точки описується дугою кола із центром всередині центроїди, а другий варіант – поза центроїдою (ці два варіанти характеризують точки основного типу). Дуга кривої поблизу центральної точки описується двома дотичними колами, центри яких розташовані по різні боки від дотичної в центральній точці (цей варіант придатний для точок перегину). Необхідно відзначити, що профіль може містити точки перегину з розривом за кривизною, саме для цих точок і наведемо третій варіант: якщо на профілі виникає точка перегину (кривизна дорівнює нулю), то її можна розглядати як граничний випадок точки перегину з розривом за кривизною. Для першого варіанта $l = l(\varphi)$ при $\alpha = 0,5\pi$ (центральна точка) має мінімум і $l''_\varphi < 0$, для другого – максимум і $l''_\varphi < 0$.

Якщо маємо власну точку перегину, то радіуси малих дуг кіл нескінченно зростають і зливаються в малому з відрізком дотичної в центральній точці. Цей граничний випадок не несе змін до твердження, що дотична до лінії зачеплення в точці, яка відповідає центральній, перпендикулярна осі y . Випадок $l = 0$ також призводить до невизначеності, однак рівність нулю величини l в центральній точці на практиці не зустрічається, крім того, розглядаючи граничний перехід $l \rightarrow 0$, прийдемо до того ж результату. Щодо рівності $l = 0$, то необхідно відзначити, що сама по собі вона зустрічається дуже часто, але не в центральній точці. Тоді лінія зачеплення проходить через полюс P і перетинає вісь під кутом, який визначали за допомогою правила Лопіталія.

Кут, який отримано, залежить від співвідношення вищих похідних від проєкцій вектора \overline{T}'_n за φ . Так, наприклад, для евольвентного профілю лінією зачеплення є пряма,

яка проходить через точку з довільним кутом нахилу до осі x . Евольвентний профіль не має центральної точки в тому сенсі, у якому ми її вище визначили, хоча і перетинається двічі колами, що мають своїм центром центр центроїди C . Таке відбувається, тому що евольвентний профіль не є гладким, він містить особливу точку повернення першого порядку.

Дослідимо можливість виникнення на ній особливих точок та уявімо, що на лінії зачеплення є особлива точка, тоді вектор \bar{T}'_n невизначений і його проєкції на осі координат дорівнюють нулю:

$$(l \cos \alpha)'_{\varphi} = (l \sin \alpha)'_{\varphi} = 0.$$

Вектор \bar{T}'_n має такий вигляд:

$$\bar{T}' = \bar{t} \left(1 + \frac{d\bar{t}}{dS} - \frac{l_n}{q} \right) + \bar{n} \frac{dl_n}{dS} + \frac{l_t}{q}.$$

Враховуючи, що $l_t = l \cos \alpha$, $l_n = l \sin \alpha$, $S = R\varphi$, $q = R$, радіус кривизни центроїди C , спряженої з вихідним профілем з останньої формули, отримаємо

$$\bar{T}' = \bar{t} \left(1 + (l \cos \alpha)'_{\varphi} \right) \frac{1}{R} - (l \sin \alpha) \frac{1}{R} + \bar{n} (l \sin \alpha)'_{\varphi} \frac{1}{R} + (l \cos \alpha) \frac{1}{R}.$$

Якщо вектор $\bar{T}' = \bar{T}R$, то напрямний вектор дотичної до профілю матиме такий вигляд:

$$\bar{T}' = \bar{t} \left(R + (l \cos \alpha)'_{\varphi} - l \sin \alpha \right) + \bar{n} \left((l \sin \alpha)'_{\varphi} + (l \cos \alpha) \right). \quad (8)$$

У разі появи особливої точки на лінії зачеплення вираз (8) набуде такого вигляду:

$$\bar{T}' = \bar{t} (R - l \cos \alpha) + \bar{n} (l \cos \alpha). \quad \square$$

Оскільки $(l \cos \alpha)'_{\varphi} = (l \sin \alpha)'_{\varphi} = 0$, то вектор \bar{l} у тій же системі координат, заданій ортами \bar{l} і \bar{n} , має такий вигляд:

$$\bar{l} = \bar{t}l_t + \bar{n}l_n = \bar{t}(l \cos \alpha) + \bar{n}(l \sin \alpha). \quad \square$$

Запишемо вираз скалярного добутку векторів \bar{T}' і \bar{l} у точці профілю, що відповідає особливій точці на лінії зачеплення:

$$\bar{T}' \cdot \bar{t} = (R - l \sin \alpha)(l \cos \alpha) + (l \cos \alpha)(l \sin \alpha) = Rl \cos \alpha. \quad (9)$$

Оскільки \bar{l} – напрямний вектор нормалі до профілю, то

$$\bar{T} \cdot \bar{l} = 0. \quad (10)$$

З виразу (9) випливає, що рівняння (10) виконується, якщо $\bar{l} = 0$, тобто в точці лінії зачеплення, що збігається з полюсом P , або якщо $\cos \alpha = 0$, тобто в точці, що відповідає центральній точці профілю. Припустимо, що на лінії зачеплення крім точок, які належать осі y , є точки, що відповідають центральній точці профілю (дотична до лінії зачеплення в цій точці перпендикулярна осі y , відповідно, може виникнути тільки точка повернення), і ті точки, що збігаються з P . Отже, лише саме в цих точках лінія зачеплення може мати особливі точки, які можуть вказувати на виникнення інтерференції, інші ж точки лінії зачеплення звичайні. Якщо $(l \cos \alpha)'_{\varphi}$ і $(l \sin \alpha)'_{\varphi}$ не обертаються в нуль одночасно, то на лінії зачеплення може виникнути точка перегину.

Висновки. У результаті проведеного дослідження оптимізовано аналітичне технічне рішення, визначено особливі точки та точку перегину контактної поверхні зачеплення спряжених кінематичних пар, які можуть викликати інтерференцію. Звідси випливає, що в точках перегину, які виникли в точці, що відповідає центральній точці P , є рівність нулю перших похідних $(l \cos \alpha)'_{\varphi}$ і $(l \sin \alpha)'_{\varphi}$, а відмінною від нуля є похідна радіуса-вектора непарного порядку. В інших точках лінії зачеплення може виникнути точка перегину, яка характеризується тим, що $(l \cos \alpha)'_{\varphi}$ і $(l \sin \alpha)'_{\varphi}$ нерівні нулю одночасно.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Podkorytov A. Theoretical Bases of Conjugate Quazihelical Surfaces, Excluding Interference // 10th Intern. Conf. on Engineering Design Graphios and Descriptive Geometry. Texas, USA, Austin. 2002. Vol. 1. P. 43–47.
2. Подкоритов А. М., Ісмаїлова Н. П. Загальний ітераційний метод виключення інтерференції спряжених квазігвинтових поверхонь // Сучасні проблеми моделювання. Мелітополь : Мелітопольський держ. пед. ун-т, 2016. Вип. 5. С. 98–103. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/1488> (дата звернення: 01.10.2024).
3. Подкоритов А. М. Ітераційний метод та алгоритм виключення інтерференції складних спряжених поверхонь за наперед заданими умовами // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Міжвідомча наук.-техніч. збірка. Київ : КНУБА, 2000. Вип. 64. С. 109–113.
4. A Model to Determine Mesh Characteristics in a Gear Pair with Tooth Profile Error / Qibin Wang, Peng Hu, Yimin Zhang et al. // Follow Journal. October 2014. Advances in Mechanical Engineering 2014:1-10. URL: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Peng-Hu-2068779212> (last accessed: 15.10.2024).
5. Development of the Method for the Formation of One-Dimensional Contours by the Assigned Interpolation Accuracy / Y. Havrylenko, Y. Kholodniak, O. Vershkov, A. Naidysh // Eastern-

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123921>

6. Jacob D., Ramana K., Rao P. Automated Manufacturability Assessment of Rotational Parts by Grinding // International Journal of Production Research. 2004. Vol. 42 (3). P. 505–519.

<https://doi.org/10.1080/00207540310001613674>

7. Saghafi A., Farshidianfar A. An Analytical Study of Controlling Chaotic Dynamics in a Spur Gear System // Mechanism and Machine Theory. February 2016. Vol. 96, Iss. 1. P. 179–191.

<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.10.002>

8. Farshidianfar A., Saghafi A. Identification and Control of Chaos in Nonlinear Gear Dynamic Systems Using Melnikov Analysis // Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys. 2014. Vol. 378. P. 3457–3463.

<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2014.09.060>

9. Linkage Model and Manufacturing Process of Shaping Non-Circular Gears / Fangyan Zheng, Lin Hua, Xinghui Han et al. // Mechanism and Machine Theory. February 2016. Vol. 96, Iss. 1. P. 192–212.

<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.09.010>

10. Ismailova N., Bogach V., Lebedev B. Development of a Technique for the Geometrical Modeling of Conjugated Surfaces when Determining the Geometrical Parameters of an Engagement Surface Contact in Kinematic Pairs // Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies. Kharkiv: Technology Center, 2020. № 1/4 (106). P. 17–22.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209108>

11. Ismailova N. P., Mohylyanets T. M., Oliynyk N. V. Graphoanalytical Profiling of Conjugate Curvilinear Surfaces of a Cutting Tool // Collection of Scientific Works of the Military Academy (Odesa). 2023. № 1 (19). P. 23–28.

<https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.19.23-28>

Стаття надійшла до редакції 19.11.2024.

REFERENCES

1. Podkorytov, A. (2002). Theoretical Bases of Conjugate Quazihelical Surfaces, Excluding Interference In *10th Intern. Conf. on Engineering Design Graphics and Descriptive Geometry, Vol. 1.* (pp. 43–47). Texas, USA, Austin.

2. Podkorytov, A. M., & Ismailova, N. P. (2016). Zahalnyi iteratsiynii metod vykliuchennia interferentsii spriazhenykh kvazihvyntovykh poverkhon [General Iterative Method for Eliminating Interference of Conjugate Quasi-Helical Surfaces]. *Suchasni problemy modeliuвання [Modern Problems of Modeling]*, 5, 98–103. Melitopol. Retrieved from <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/1488> [in Ukrainian].

3. Podkorytov, A. M. (2000). Iteratsiyniyi metod ta alhorytm vykliuchennia interferentsii skladnykh spriazhenykh poverkhon za napered zadanymy umovamy [Iterative Method and Algorithm for Eliminating Interference of Complex Conjugate Surfaces under Predetermined Conditions]. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika. Mizhvidomcha nauk.-tekhnich. zbirka [Applied Geometry and Engineering Graphics. Interdepartmental Scientific and Technical Collection]*, 64, 109–113. Kyiv [in Ukrainian].

4. Qibin Wang, Peng Hu, & Yimin Zhang et al. (2014). A Model to Determine Mesh Characteristics in a Gear Pair with Tooth Profile Error. *Follow Journal. Advances in Mechanical*

Engineering. Retrieved from <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Peng-Hu-2068779212>

5. Havrylenko, Y., Kholodniak, Y., Vershkov, O., & Naidysh, A. (2018). *Development of the Method for the Formation of One-Dimensional Contours by the Assigned Interpolation Accuracy. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1, Iss. 4 (91), 76–82.* <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123921>
6. Jacob, D., Ramana, K., Rao, P. (2004). Automated Manufacturability Assessment of Rotational Parts by Grinding. *International Journal of Production Research, 42 (3), 505–519.* <https://doi.org/10.1080/00207540310001613674>
7. Saghafi A., Farshidianfar A. An Analytical Study of Controlling Chaotic Dynamics in a Spur Gear System // *Mechanism and Machine Theory*. February 2016. Vol. 96, Iss. 1. P. 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.10.002>
8. Farshidianfar, A., & Saghafi, A. (2014). Identification and Control of Chaos in Nonlinear Gear Dynamic Systems Using Melnikov Analysis. *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys., 378, 3457–3463.* <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2014.09.060>
9. Fangyan Zheng, Lin Hua, Xinghui Han, Bo Li, & Dingfang Chen. (2016). Linkage Model and Manufacturing Process of Shaping Non-Circular Gears. *Mechanism and Machine Theory, Vol. 96, Iss. 1, 192–212.* <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.09.010>
10. Ismailova, N., Bogach, V., & Lebedev, B. (2020). Development of a Technique for the Geometrical Modeling of Conjugated Surfaces when Determining the Geometrical Parameters of an Engagement Surface Contact in Kinematic Pairs. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 1/4 (106), 17–22.* Kharkiv. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209108>
11. Ismailova, N. P., Mohylyanets, T. M., & Oliynyk, N. V. (2023). Graphoanalytical Profiling of Conjugate Curvilinear Surfaces of a Cutting Tool. *Collection of Scientific Works of the Military Academy (Odesa), 1 (19), 23–28.* <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.19.23-28>

N. P. Ismailova, I. S. Mikryukov, L. G. Bykova

TECHNICAL SOLUTION IN DESIGNING COUPLED GEAR ENGAGEMENTS REGARDING THE DETERMINATION OF INTERFERENCE IN WEAPONS AND MILITARY TECHNIQUES

In the complex realities of the modern industry of Ukraine, an important direction of scientific and technical development is the optimization of technical solutions in the design of coupled gears of kinematic pairs regarding the determination of interference in weapons and military equipment with increased requirements for the degree of complexity of the designed products and shortening the terms of order fulfillment. Given the serious pressure of crisis phenomena in the economy and increased competition on the market, these components force us to carry out work at the most modern technical level.

The paper proposes the optimization of the analytical technical solution for designing the contact line between the axes of the coupled gear engagements of kinematic pairs to determine the interference. This will make it possible to reduce the equation to a parametric form, to

algorithmize and optimize the modeling of the product, and to design the contact surface of the gear when designing products in weapons and military equipment.

The technical solution to the given problem refers to gear-coupled mechanisms of external engagement, the shape of the teeth of the wheels is formed by wrapping the initial contour of the gear rack, and the number of teeth is determined depending on the purpose of the mechanism, the required gear ratio and diametrical dimensions. Such mechanisms are used in various units and units of weapons and military equipment, namely in the form of gear wheels of reducers, winches, planetary and wave gears and as working bodies of pumps, hydraulic motors, compressors and internal combustion engines with straight and helical teeth. To avoid interference at the design stage, it is necessary to analyze the technical curvilinear characteristics of the conjugated surfaces. The application of technical solutions for the description of real surfaces obtained as a result of the creation of a curvilinear model reflects the real physical process of determining interference.

Keywords: *design; kinematic couples; modeling; interference; optimization; gear engagement; conjugated surfaces; technical solution; modeling; parameterization; contact line of engagement.*