Лекція 12
Тема: Відомості з теорії зачеплення

Зміст:

1. Вимоги до профілів зубців коліс

Профілі зубців круглих зубчастих коліс повинні забезпечувати задане передаточне відношення не тільки в середньому, але й у будь-який момент часу. Це означає, що при $\omega_{вх} = const$ повинно бути в будь-який момент часу $\omega_{вих} = const$.

У противному випадку будуть з'являтися шкідливі динамічні навантаження, обумовлені нерівномірністю обертання ведених мас машини.

Профілі зубців, що забезпечують задане передаточне відношення, називаються спряженими.

У теорії зачеплення розглядаються задачі профілювання спряжених профілів, визначення їхньої взаємодії, відшукання кількісних характеристик різноманітних зачеплень.

Нижче докладно розглядаються деякі питання теорії зачеплення, що відносяться до круглих циліндричних коліс. Питання, які відносяться до конічного, черв'ячного і деяких інших зачеплень, викладені коротко лише в частині їхніх особливостей у порівнянні з циліндричними колесами.

2. Основний закон зачеплення

Закон установлює геометричну вимогу, якій задовольняють спряжені профілі. Іноді цей закон називають основною теоремою зачеплення (теоремою Вілліса).

Ось формулювання теореми.

Загальна нормаль у точці торкання спряжених профілів зубців поділяє лінію центрів коліс у відношенні, зворотно пропорційному кутовим швидкостям коліс.

Очевидно, що при

$$i_{1-2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = const$$

точка $П$ ділення лінії центрів повинна бути на ній зафіксованою (тобто нерухомою). Точка $П$ - називається полюсом зачеплення.

Розглянемо доказ теореми (закону) по рис. 4.1.

На рисунку позначено:

O_1O_2 - лінія центрів (міжосьова відстань);

n-n - загальна нормаль у точці C торкання профілів зубців 1 і 2;

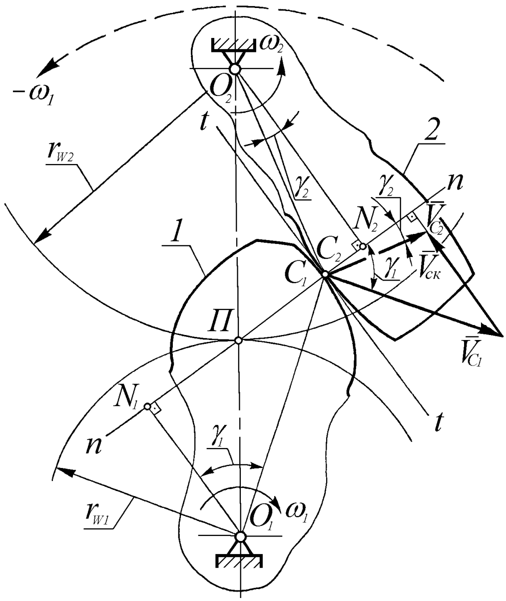

Рис. 4.1. До основного закону зачеплення

t-t - загальна дотична в точці C;

C_1 - точка зуба 1, що знаходиться в контакті;

C_2 - точка зуба 2, що знаходиться в контакті;

$\overline{V}_{C_1}$ - вектор окружної швидкості точки C_1 (направлений перпендикулярно радіусу O_1C_1 убік ω_1);

$\overline{V}_{C_2}$ - вектор окружної швидкості точки C_2 (направлений перпендикулярно радіусу O_2C_2 убік ω_2);

$\overline{V}_{ск}$ - вектор швидкості сковзання зубців (направлений уздовж t-t);

$\rho_1 = O_1N_1$ - найкоротша відстань від центру колеса 1 до загальної нормалі n-n;

$\rho_2 = O_2N_2$ - те ж - для колеса 2;

$П$ - полюс зачеплення (точка перетинання загальної нормалі n-n із лінією центрів O_1O_2);

r_{w1} , r_{w2} - радіуси початкових окружностей коліс 1 і 2;

γ_1, γ_2 - допоміжні кути.

Доказ теореми можна здійснити через так звану умову безвідривності торкання профілів: *проекції векторів окружних швидкостей точок профі-*

лів, що знаходяться в контакті, на загальну нормаль n-n однакові, тобто

$$\overline{V}_{C_1}\cdot\cos\gamma_1=\overline{V}_{C_2}\cdot\cos\gamma_2.$$

Припустимо, що це не так.

Нехай, наприклад,

$$\overline{V}_{C_2}\cdot\cos\gamma_2>\overline{V}_{C_1}\cdot\cos\gamma_1\ .$$

Тоді зуб 2 буде іти від зуба 1 із безупинним наростанням зазору.

Якщо ж припустити, що

$$\overline{V}_{C_1}\cdot\cos\gamma_1>\overline{V}_{C_2}\cdot\cos\gamma_2,$$

тоді зуб 1 буде вклинюватися в зуб колеса 2.

Ні перше, ні друге припущення не можуть мати місця при нормальній роботі зачеплення, і значить умова безвідривності торкання профілів вірна.

Тому що

$$V_{C_1}=\omega_1\cdot O_1C_1,\ \text{а}\ V_{C_2}=\omega_2\cdot O_2C_2,$$

перепишемо умову безвідривності профілів у вигляді

$$\omega_1\cdot O_1C_1\cdot\cos\gamma_1=\omega_2\cdot O_2C_2\cdot\cos\gamma_2.$$

Помітимо, що

$$O_1C_1\cdot\cos\gamma_1=\rho_1,$$
$$O_2C_2\cdot\cos\gamma_2=\rho_2,$$

тоді одержимо вираз

$$\omega_1\cdot\rho_1=\omega_2\cdot\rho_2\ ,$$

звідкіля будемо мати

$$\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

З подібності прямокутних $\Delta O_1N_1\Pi$ і $\Delta O_2N_2\Pi$, що мають той же самий гострий кут при вершині Π виразимо відношення

$$\frac{\rho_2}{\rho_1}=\frac{O_2\Pi}{O_1\Pi}=\frac{r_{w2}}{r_{w1}}.$$

Остаточно знайдемо

$$i_{1-2}=\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{r_{w2}}{r_{w1}}, \tag{4.1}$$

що і було потрібно довести.

Відзначимо, що

$$O_1O_2=r_{w1}+r_{w2}=const,$$

При $i_{1\text{-}2}=const$ це означає, що полюс зачеплення (точка Π) займає на лінії центрів O_1O_2 фіксоване положення, тобто, що

$$r_{w1} = const \text{ і } r_{w2} = const.$$

Переконаємося, що проведені через точку Π із центрів O_1 і O_2 окружності радіусів r_{w1} і r_{w2} котяться одна по одній без прослизання.

З виразу (4.1) слідує, що

$$\omega_1 \cdot r_{w1} = \omega_2 \cdot r_{w2},$$

отже окружні швидкості окружностей радіусів r_{w1} і r_{w2} збігаються по величині, а з рис. 4.1 очевидно, що вони також мають і загальний напрямок. Значить ці окружності котяться одна по одній без прослизання. Їх прийнято називати, як уже вказувалося в розділі III, початковими.

Тепер розглянемо відносний рух зубців, що знаходяться в зачепленні.

Для цього здійснимо уявну зупинку, наприклад, колеса 1 за методом обернення руху подібно тому, як це робилося у відношенні планетарних зубчастих передач.

Не порушуючи роботи зачеплення, мислено повідомимо всьому механізму додаткову кутову швидкість $-\omega_1$ (рівну по величині ω_1, але протилежно їй направлену).

Тоді побачимо колесо 1 зупиненим. При цьому колесо 2 буде мати рух, що відповідає цілком його відносному руху відносно колеса 1.

Миттєвим полюсом перекочування колеса 2 по колесу 1 є полюс зачеплення Π.

Відносна кутова швидкість перекочування колеса 2 по колесу 1, як очевидно з креслення,

$$\omega_{2/1} = \omega_1 + \omega_2. \tag{4.2}$$

Справді: колесо 1 спостерігається зупиненим, а колесо 2 мало свою абсолютну кутову швидкість ω_2 і до неї додалася повідомлена всьому механізму, а значить і колесу 2, додаткова кутова швидкість того ж напрямку, що і ω_2, рівна кутовий швидкості ω_1. З такою ж відносною кутовою швидкістю $\omega_{2/1}$ перекочуються один по одному всі дотичні елементи коліс 1 і 2, тобто зубці 1 і 2.

Крім того, зубці сковзають один по одному зі швидкістю $V_{ск}$.

Величина швидкості сковзання буде

$$V_{ск} = \Pi C \cdot (\omega_1 + \omega_2). \tag{4.3}$$

Доказ вірності формули (4.3) можна здійснити так.

Якщо зуб 1 спостерігається зупиненим, тоді точка C_2 зуба 2 відносно нерухомої точки C_1 зуба 1 буде мати лінійну швидкість, пропорційну відстані до миттєвого полюса Π (тобто відстані ΠC) і відносній кутовій швидкості

$$\omega_{2/1} = \omega_1 + \omega_2.$$

Відносна лінійна швидкість $V_{C_2C_1}$ і є швидкістю сковзання зубців

$V_{ск}$, тому що зуб 1 в оберненому русі нерухомий.

Остаточно встановлюємо, що зубці під час зачеплення перекочуються один по одному з постійною відносною кутовою швидкістю $(\omega_1+\omega_2)$ і сковзають із перемінною швидкістю $V_{ск}$, у залежності від відстані точки контакту до полюса зачеплення $П$.

В момент переходу точки контакту через полюс $V_{ск}=0$, а також при цьому відбувається зміна знака швидкості $V_{ск}$, тобто зміна її напрямку.

До полюсного положення зачеплення зубці сковзають назустріч один одному (зближаються), а після зачеплення в полюсі вони віддаляться один від одного.

Чим далі точка контакту зубців від полюса $П$, тим більша швидкість їхнього сковзання.

У внутрішньому зачепленні, тому що на відміну від зовнішнього ω_1 і ω_2 направлені в один і той самий бік, відносна кутова швидкість коліс буде

$$\omega_{2/1}=\omega_1-\omega_2,$$

а швидкість сковзання зубців при цьому становитиме

$$V_{ск} = ПС\cdot(\omega_1-\omega_2).$$

Бачимо, що у внутрішньому зачепленні при порівняних умовах швидкість сковзання зубців буде меншою, ніж у зовнішньому.

Це і пояснює те, що на практиці спостерігається більш високий ККД внутрішнього зачеплення в порівнянні з зовнішнім.

3. Лінія зачеплення

Геометричне місце точок на площині центрів коліс, у котрих різночасно стикаються спряжені профілі, називається лінією зачеплення.

У загальному випадку (для довільних спряжених профілів) лінія зачеплення - це довільна крива лінія, що проходить через полюс зачеплення (через точку $П$).

У таких поширених профілів, як евольвентні, лінія зачеплення є прямою лінією, що визначає всі виняткові властивості цього зачеплення.

У циклоїдального зачеплення - це крива, що складається з двох дуг окружностей, сполучених у полюсі зачеплення $П$, які мають різні радіуси і протилежну кривизну.

У цівкового зачеплення - це кардіоїда.

У зачеплення Новікова - це тільки точка в торцевому перерізі, віддалена від полюса в той або інший бік (останнім часом - дві точки: одна - до, і друга - після полюса, які розташовані в різних торцях по глибині креслення).

Існує теорема Рело, в якій доказується, що вигляд лінії зачеплення визначається одним окремо взятим профілем.

З цієї теореми слідує висновок, що спряжені профілі мають однакову, тобто ту саму, лінію зачеплення.

Теорема Рело (її слідства) дозволяє побудувати будь-яку множину пар кривих ліній, які можна використовувати в якості спряжених профілів.

Послідовність побудов така.

Спочатку вибираємо профіль 1 у вигляді довільної плавної кривої лінії (із деякими обмеженнями).

Потім по ньому будуємо лінію зачеплення.

Після цього по лінії зачеплення, вирішуючи зворотну за змістом задачу, будуємо профіль 2, спряжений з профілем 1.

Враховуємо при цьому, що профілі 1 і 2 обов'язково задовольняють вимогам основного закону зачеплення.

З величезного різноманіття можливих спряжених профілів у даний час використовується лише декілька.

Найпоширеніший профіль - евольвентний.

На ньому і його властивостях ми і зупинимося нижче більш докладно.

4. Евольвентне зачеплення. Загальні відомості

Евольвента - це розгортка кривої.

Нижче будемо розуміти евольвенту як розгортку окружності, тобто як евольвенту окружності.

Евольвенту можна побудувати різними графічними прийомами. Наприклад, можна побудувати евольвенту, як траєкторію будь-якої точки прямої лінії, що перекочується по окружності без прослизання. Цю пряму лінію будемо називати твірною, а окружність - основною, яка має також математичну назву - еволюта.

Основна окружність (еволюта) - це і є крива лінія, яка розгортається. Її чудова властивість складається в тому, що вона є геометричним місцем центрів кривизни евольвенти (рис. 4.2).

На рисунку позначене:

M - початкова точка евольвенти $MABCDE...$;

$mabcde...$ - еволюта (основна окружність);

$\rho_A, \rho_B, \rho_C, \rho_D, \rho_E, ...$ - радіуси кривизни евольвенти в точках $A, B, C, D, E, ...$.

З рис. 4.2 можна усвідомити основні властивості евольвенти:

1. Евольвента - це безкінечна спіраль, яка починається в довільній точці M на еволюті.

2. Одна й та сама еволюта може утворити скільки завгодно еквідистантних (рівновіддалених) евольвент.

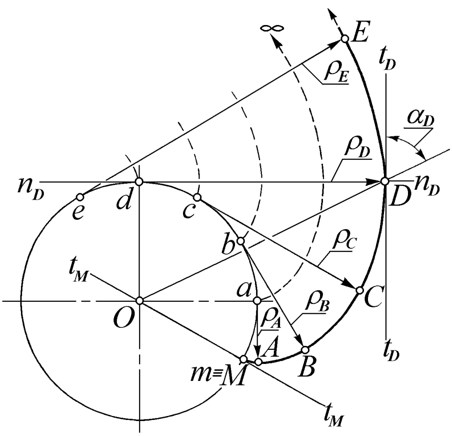

Рис. 4.2. Евольвента окружності

3. Кривизна евольвенти $k = \dfrac{1}{\rho}$ зменшується від ∞ до 0 в міру віддалення евольвенти від її початку (а радіус кривизни ρ - зростає від 0 до ∞). Радіус кривизни евольвенти в її початку (т. M) дорівнює нулю, а кривизна - дорівнює нескінченності ($\rho_M = 0$; $k_M = \infty$).

4. Профільний кут α_Y евольвенти (кут між радіальним променем і дотичною до евольвенти) зростає від 0 до $\pi/2$. На початку евольвенти (у точці M) кут $\alpha_M = 0$, тобто дотична до евольвенти в точці M проходить через центр еволюти (через точку O).

5. Нормаль n-n евольвенти в будь-якій її точці направлена по дотичній до еволюти.

5. Рівняння евольвенти

Зручно одержати рівняння евольвенти в полярних координатах, записане в параметричній формі.

На рис. 4.20 показана евольвента окружності заданого радіуса r_b.

Тут позначено:

Y - довільна точка на евольвенті;

α_Y - профільний кут евольвенти в точці Y (α_Y - перемінний величина по периметру евольвенти);

M - початкова точка евольвенти;

$\bar{r}_b$ - початкове положення радіуса-вектора евольвенти;

$\bar{r}_Y$ - поточне положення радіуса-вектора (функції рівняння в полярних координатах) евольвенти;

θ_Y - аргумент рівняння евольвенти в полярних координатах;

O - початок координат;

n_Y - n_Y - нормаль до евольвенти в точці Y;

t_Y - t_Y - дотична до евольвенти в точці Y.

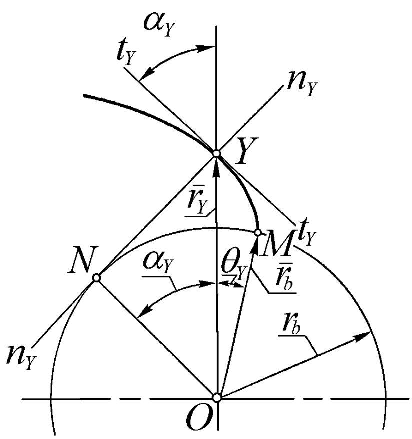

Рис. 4.3. До виводу рівняння евольвенти в полярних координатах

Функцію евольвенти в полярних координатах

$$\bar{r}_Y = f(\theta_Y)$$

запишемо в параметричному вигляді:

$$r_Y = f_1(\alpha_Y); \qquad (4.4)$$

$$\theta_Y = f_2(\alpha_Y). \qquad (4.5)$$

Перемінний профільний кут евольвенти α_Y (не плутати з фіксованим його значенням $\alpha=20^0$ на ділильній окружності й у так званого початкового контуру) приймемо за незалежний параметр рівняння евольвенти.

Рівняння (4.4) можна записати з ΔONY у вигляді

$$r_Y = r_b / \cos\alpha_Y. \qquad (4.6)$$

Рівняння (4.5) витікає з рівності довжин відрізка прямої NY і дуги основної окружності NM. Ця рівність походить з властивостей евольвенти - розгортка дуги NM при утворенні евольвенти збігається по довжині з відрізком NY дотичної до основної окружності.

Тому що відрізок прямої $|NY| = r_b \cdot tg\alpha_Y$, а відрізок дуги $|NM| = r_b(\alpha_Y + \theta_Y)$, рівняння (4.5) перепишеться у вигляді

$$\theta_Y = tg\alpha_Y - \alpha_Y = inv\alpha_Y. \qquad (4.7)$$

Функція θ_Y названа евольвентною або інволютною функцією. Обчислення її значення при заданому α_Y не представляє складної задачі.

Проте, якщо необхідно виконати обчислення α_Y по відомому θ_Y, то в цьому випадку доводиться вирішувати трансцендентну задачу. Її можна чисельно вирішувати з будь-якою наперед вибраною точністю методом ітерацій (послідовних наближень).

Приблизно (із помилкою не більш $6'$) обчислення α_Y в градусах по відомому θ_Y можна здійснити по формулі, запропонованій В. А. Перегоном та Янчевським І. В.

$$\alpha_Y = 83{,}072 \cdot (inv\alpha_Y)^{0{,}334} - 20{,}139 \cdot (inv\alpha_Y)^{0{,}94}.$$

Для зручності при виконанні точних розрахунків евольвентного зачеплення в довідковій літературі поміщаються готові таблиці інволютної функції $inv\alpha_Y$. Наводимо тут стислу вибірку із шестизначної таблиці інволютної (евольвентної) функції.

Значення інволютної функції ($inv\,\alpha_Y = tg\,\alpha_Y - \alpha_Y$)

Таблиця 4.1

Кут α (град)	Порядок	0,0'	10'	20'	30'	40'	50'
15	0,00	615	636	658	680	702	725
16	0,00	749	773	798	823	849	876
17	0,0	0902	0930	0958	0987	1016	1046
18	0,0	1076	1107	1139	1171	1203	1237
19	0,0	1271	1306	1342	1378	1415	1452
20	0,0	1490	1529	1569	1609	1650	1692
21	0,0	1734	1778	1822	1866	1912	1958
22	0,0	2005	2053	2102	2154	2202	2253
23	0,0	2304	2358	2411	2466	2521	2578
24	0,0	2635	2693	2752	2812	2873	2935
25	0,0	2997	3061	3126	3192	3258	3326
26	0,0	3394	3464	3535	3607	3680	3754
27	0,0	3828	3905	3982	4060	4140	4220
28	0,0	4302	4384	4468	4554	4640	4728
29	0,0	4816	4906	4998	5090	5184	5278
30	0,0	5375	5473	5572	5672	5774	5876
31	0,0	5981	6087	6194	6302	6412	6524
32	0,0	6636	6751	6866	6984	7103	7223
33	0,0	7345	7468	7593	7720	7848	7978
34	0,0	8110	8243	8378	8514	8652	8792
35	0,0	8934	9078	9223	9370	9519	9670

6. Взаємодія евольвентних профілів

На рис. 4.4 показані дві евольвенти E_1 і E_2 у різних взаємних положеннях при деякій довільній міжосьовій відстані a_w, яку назвемо монтажною (тобто такою, яка залежить від умов монтажу зубчастих коліс).

Розглянемо спочатку торкання евольвент у деякій точці K.

З властивостей евольвенти слідує, що пряма KN_1, проведена з точки K дотично до основної окружності радіуса r_{b1}, є нормаллю до евольвенти E_1.

На тій же підставі пряма KN_2, проведена дотично до основної окружності радіуса r_{b2}, є нормаллю до евольвенти E_2.

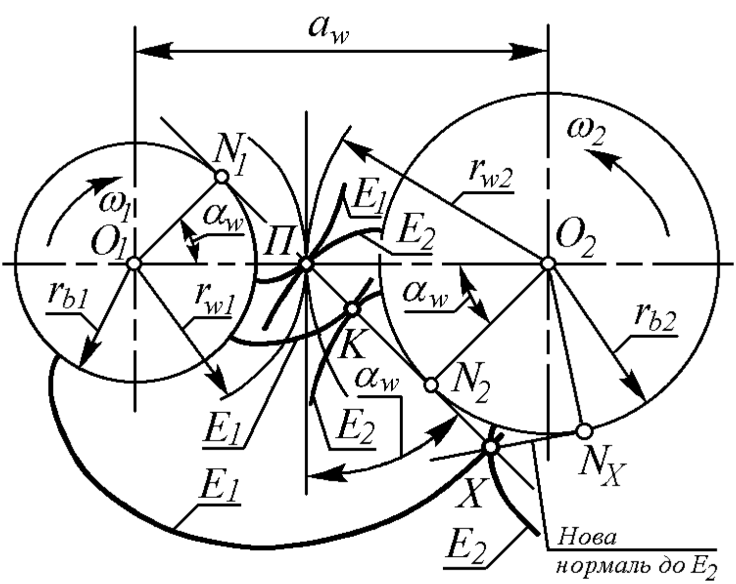

Рис. 4.4. Взаємодія двох евольвентних профілів

Відрізки KN_1 і KN_2 складають загальну пряму N_1N_2, дотичну до двох основних окружностей. Отже, пряма N_1N_2 буде загальною нормаллю до двох евольвент, які із цієї причини (на підставі основного закону зачеплення) є спряженими профілями, і її можна розглядати як геометричне місце точок контакту спряжених евольвент E_1 і E_2 - тобто як лінію евольвентного зачеплення.

Точка $П$ на перетинанні лінії зачеплення з міжосьовою лінією O_1O_2 є полюсом евольвентного зачеплення.

Окружності радіусів r_{w1} і r_{w2}, що дотикаються в полюсі зачеплення, є початковими окружностями, які перекочуються одна по одній без сковзання.

Кут α_w між лінією зачеплення і прямою, перпендикулярною до міжосьової лінії, є кутом евольвентного зачеплення, який теж називається монтажним.

Центральні кути $\angle N_1O_1П$ і $\angle N_2O_2П$ за умовою взаємної перпендикулярності сторін рівні куту зачеплення α_w.

З рисунка 4.4 слідує, що кут профілю евольвенти в точці евольвенти, що лежить на початковій окружності, чисельно дорівнює куту зачеплення α_w.

Евольвентне зачеплення допускає зміну міжосьової відстані a_w із зберіганням раніше передбаченого передаточного відношення. Зміна міжосьової відстані a_w позначиться тільки на величині кута зачеплення α_w і на величинах радіусів початкових окружностей r_{w1} і r_{w2}.

Дуже важливою є властивість евольвентного зачеплення, яка полягає в тому, що евольвентні профілі являються спряженими тільки в межах відрізка N_1N_2 лінії зачеплення.

Евольвенти E_1 і E_2, що проходять через деяку точку X, розташовану поза ділянкою N_1N_2 (рис. 4.4), не мають загальної нормалі.

Це означає, що евольвенти не дотикаються в точці X, а перетинаються.

Те ж саме відбудеться поза ділянкою N_1N_2 вище точки N_1.

Тому ділянка N_1N_2 називається теоретичною ділянкою лінії зачеплення.

У проектованих зачепленнях контакт евольвентних профілів допустимий тільки в межах теоретичної ділянки лінії зачеплення N_1N_2, у противному випадку можлива поломка зубців або ж заклинення передачі.

З прямолінійності лінії зачеплення витікають всі основні переваги евольвентного профілю:

1. Завжди спряженими будуть будь-які евольвентні профілі (як евольвенти двох різних окружностей), тобто незалежно від чисел зубців коліс - адже вони мають ту саму лінію зачеплення (пряму), що і забезпечує їхню спряженість відповідно до теореми Рело.

2. Тим самим евольвентним зубонарізним інструментом (із фіксованим числом зубців $z_{інстр}$) можна нарізати будь-які евольвентні зубчасті колеса (із будь-яким числом зубців z) - усі профілі зубців при цьому будуть залишатися спряженими, тобто в даному випадку евольвентними.

3. Тому що лінія зачеплення завжди йде по нормалі до евольвентного профілю у всіх його точках, то і сила тиску зуба на зуб (без урахування сил тертя) буде зберігати свій напрямок - по лінії зачеплення в будь-якій фазі (у будь-який момент) зачеплення.

А тому, що лінія зачеплення проходить через полюс зачеплення під постійним кутом, то і сила взаємодії зубців незалежно від фази зачеплення буде зберігати свій постійний напрямок.

При постійному переданому обертовому моменті сил, сила тиску зуба на зуб не буде, таким чином, змінювати ні своєї величини, ні свого напрямку.

Стабільність сили взаємодії зубчастих коліс по величині і напрямку при її розкладанні на три виняткові напрямки (окружний, радіальний та осьовий) дає всі постійні складові.

Це забезпечує передачам із евольвентним зачепленням у режимі постійного потоку потужності відсутність вібрацій по напрямках всіх осей декартової системи координат.

4. Зубчасті колеса з евольвентними профілями зубців мають взаємозамінність. Тому звичайно при ремонті передачі заміняють тільки те колесо, у якого знайдено дефект.

У випадку інших зачеплень звичайно рекомендують заміняти спряжену пару зубчастих коліс.

5. Евольвентні профілі нечутливі до неточності монтажу по міжосьовій відстані, тому що не втрачають при цьому спряженості. Це здешевлює виготовлення корпусних деталей.

У інших видів зачеплень вимоги до точності забезпечення міжосьової відстані більш жорсткі.

Справедливості заради, слід зазначити, що евольвентне зачеплення має і свої недоліки:

1. Втрати потужності на подолання сил тертя при профільному ковзанні, пропорційні швидкості ковзання, у евольвентного зачеплення вищі, ніж у деяких інших поширених зачеплень (циклоїдального, цівкового, Новікова), тому що швидкість ковзання пропорційна віддаленню точки контакту від полюса зачеплення, а по прямій (в евольвентного зачеплення) можна піти далі від полюса, ніж по кривій (в інших зачеплень).

Таким чином, ККД евольвентних профілів хоч і високий, але все ж дещо нижчий, ніж в інших зачеплень.

2. Обмеженість довжини відрізка N_1N_2 лінії зачеплення між точками торкання до основних окружностей коліс пари зачеплення веде до явищ, що вже згадувалися при кінематичному синтезі планетарних передач:

- до обмеження мінімального числа зубців (z_{min});
- до можливої інтерференції евольвентних профілів (тобто до заклинення зубців) і до деяких інших небажаних явищ.

3. Опуклість евольвентних профілів коліс із зовнішніми зубцями, що спричиняє за собою великі контактні тиски зубців у зовнішньому зачепленні. Необхідність підвищення навантажувальної спроможності зубчастих коліс у незмінних габаритах спричиняє за собою необхідність підвищення поверхневої твердості зубців за рахунок їх термічної або термохімічної обробки, що ускладнює й здорожує виробництво евольвентних зубчастих коліс.

При цьому виникає непереборна межа навантажувальної спроможності.

Наприклад, зачеплення Новікова має більш високу навантажувальну спроможність навіть без термообробки зубців, унаслідок контакту опуклої й увігнутої поверхонь зубців у зовнішньому цьому зачепленні.

7. Контрольні запитання

1. Які профілі зубів зубчастих коліс називаються спряженими?

2. Сформулюйте і доведіть основний закон (теорему) зачеплення.
3. Що таке полюс зачеплення? Які окружності називаються початковими?
4. Який відносний рух зубців у зовнішньому зачепленні?
5. Які особливості має відносний рух зубців у внутрішньому зачепленні?
6. Як визначити швидкість сковзання зубців?
7. Що таке лінія зачеплення? Які різновиди ліній зачеплення Ви знаєте?
8. Опишіть геометричні властивості евольвенти.
9. Перерахуєте переваги і недоліки евольвентного зачеплення.