

**Піліпака А.М.**

## **ПРО ОПТИМІЗАЦІЮ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ТРАСИ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ**

Одним з головних завдань дорожньої галузі є вдосконалення транспортно-експлуатаційних властивостей автомобільних доріг. Сучасна наука і практика проектування доріг показують, що одним з найважливіших напрямків його вирішення є забезпечення плавності дороги, яка формується ще на перших етапах трасування та геометричного моделювання траси майбутньої дороги. Траса дороги має бути вписана в ландшафт, тобто повинні бути підібрані та ув'язані між собою всі геометричні елементи в плані та профілі, що забезпечить плавну зміну усіх характеристик руху автомобіля і створить сприятливий психофізіологічний фон для водія.

Традиційний підхід роздільного проектування плану і профілю передбачає наступну їх ув'язку, що є проблематичним і не завжди дозволяє отримати плавну зміну кривизни траси в просторі, не гарантує безпечних і зручних умов руху.

Крім того, традиційно проектна лінія поздовжнього профілю, як і плану, конструюється із спряжених прямолінійних відрізків, дуг колових кривих або квадратичних парабол, у яких радіус по всій довжині опуклої або ввігнутої кривої є практично постійним. Критерієм плавності проектної лінії прийнято вважати узгодження проектних ухилів. Тобто в точці спряження поздовжній ухил одного елемента повинен бути рівним ухилу другого. Але перехід від одного елемента до другого не може бути плавним навіть у випадку повного співпадання ухилів в точці спряження різних елементів профілю (що не завжди досягається) через кручення на віражі.

Якщо в точці переходу від одного елемента до другого радіус вертикальної кривої змінюється стрибкоподібно, то саме ця обставина викликає додаткові вертикальні сили, які діють на автомобіль, на пасажирів, на вантаж, і в цьому проявляється порушення плавності в поздовжньому профілі.

Заміна квадратичних парабол в профілі на кубічні забезпечує плавну зміну радіусів в межах одного елемента профілю; кубічні сплайни забезпечують плавну зміну радіусів від одного елемента до іншого. [1, 2]

Дослідженням представлення траси як просторової кривої займалися: в Україні - Батракова А.Г.(розробка методики формування траси, що враховує геометрію, економію енергоресурсів, забезпечення екологічної безпеки автомобільних доріг, підвищення безпеки і поліпшення умов діяльності водія) [3], в Росії - Вдовенко А.В., Куліш В.И. (розроблено варіант просторової кривої траси автомобільної дороги з приєднаним рухомим репером Дарбу на прикладі гвинтової лінії) [2], Лобанов Е. разом з білоруськими розробниками системи CREDO (конструювання плавних автомобільних доріг з нелінійно змінною кривизною).[1, 4, 5]

Але при цьому знову залишається проблема постійної ув'язки профілю та плану.

Отже, очевидно, що для проектування найбільш плавної траси нам необхідно мати метод отримання оптимальної просторової кривої осі траси з постійно і плавно змінною кривизною, проекції якої дадуть нам план і профіль. Пропонується використання імітаційного проектування, при якому спочатку буде формуватись просторове положення траси, а вже потім розглядаються план та поздовжній профіль. Це дозволить розширити можливості проектувальника у вирішенні задач оптимізації просторового положення траси. Нелінійний закон зміни кривизни осі траси забезпечить: плавну зміну ступеня наростання доцетрового прискорення, узгодження форми кривої з топографічними умовами і просторовими обмеженнями

в кожному конкретному випадку трасування, узгодження параметрів кривої зі змінними режимами руху автомобілів, більш вірне та ефективно дотримання правил і прийомів архітектурно-ландшафтного проектування автомобільних доріг. [4]

Геометричне моделювання об'єктів у зв'язку з кінематикою руху широко використовується в багатьох сферах, на перший погляд абсолютно далеких. І цілком природним буде застосувати ці поняття в проектуванні автомобільних доріг, де геометрія траси дороги дуже тісно пов'язана з динамікою руху по ній автомобілю.

Пропонується метод імітаційного проектування, де в якості імітаційної моделі використовується гнучкий навантажений стрижень, вісь якого може приймати бажане просторове положення під прикладеним навантаженням.

Використання в якості моделі гнучкого стрижня не є чимось абсолютно новим. Відомим методом автоматизованого проектування плану траси автомобільної дороги є принцип «гнучкої лінійки». Пропонується розвинути цей підхід: використати довгий гнучкий стрижень, який під дією прикладених до нього зовнішніх сил, моментів здатен приймати будь-яке просторове положення.

Повітряну лінію між двома пунктами А і Б представляємо у вигляді осі прямолінійного ненавантаженого стрижня, а саму вісь дороги, що проектується - зігнутою віссю стрижня під прикладеним навантаженням.

Деформацію згинання стрижня характеризують переміщення точок, що лежать на його осі. Під дією зовнішнього навантаження первісно пряма вісь стрижня викривлюється в площині згинання. Утворена вісь називається зігнутою віссю стрижня або пружною лінією. Переміщеннями перерізів стрижня при згинанні є прогини (переміщення) та кути повороту. Прогин - переміщення центру ваги перерізу. Кут повороту перерізу - кут на який кожен переріз повертається по

відношенню до свого первісного положення. Деформація тієї чи іншої ділянки стрижня визначається викривленням його зігнутої осі, тобто кривизною.

Розглянемо елемент стержня в деформованому стані. В загальному просторовому випадку осьова лінія стержня має кривизни в площині  $XOY$  та  $XOZ$ , які є проєкціями кривизни просторової лінії. Крім згину в двох взаємно перпендикулярних площинах моментами  $M_x$  та  $M_z$  елемент стержня ще скручується моментом  $M_t$ , що призводить до кручення осьової лінії стержня. Кожен вузол стрижня може мати 6 ступенів свободи - переміщення по осях  $X, Y, Z$  ( $V_x, V_y, V_z$ ) та кути повороту  $U_x, U_y, U_z$ .

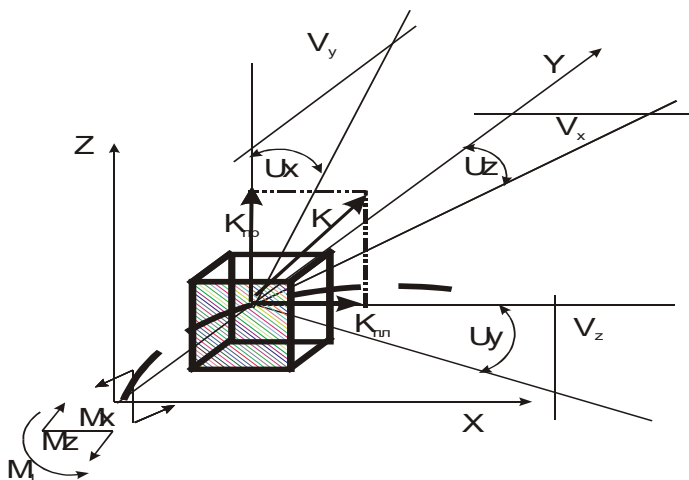


Рисунок 1 - Елемент стрижня в деформованому стані.

Нелінійні рівняння рівноваги, коли осьова лінія навантаженого стрижня просторова крива, розглянуто в [6]. Тут при виводі рівнянь рівноваги найбільш загального випадку просторово-криволінійних стрижнів застосоване векторне числення, що дозволяє отримати рівняння в найбільш компактній формі запису, зручній при перетвореннях. Використовуються дві системи координат: нерухома (декартова) та рухома, пов'язана з осьовою лінією стрижня.

Для випадку первісно прямолінійного стрижня рівняння рівноваги в декартових координатах мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 \frac{dQ_x}{de} + P_x &= 0; \\
 \frac{dM_x}{de} + (L^T i^1) \times Q_x + T_x &= 0; \\
 M_x &= L^T A \chi; \\
 \frac{dv}{de} - L_1^{-1} A^{-1} L M_x &= 0; \\
 \frac{du_x}{de} - (L^T - E) i_1 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де вектори з індексом  $x$  представлені через проєкції в декартових осях, тобто  $a_x = a_x i_1 + a_y i_2 + a_z i_3$ ,

$P$ ,  $T$  - відповідно зовнішня зосереджена сила та зовнішній зосереджений момент,

$M$ ,  $Q$  - внутрішні зусилля,

$v$  - кути повороту точок осьової лінії стержня,

$u$  - переміщення точок осьової лінії,

$L$  - матриця напрямних косинусів,

$A$  - матриця жорсткостей,

$x$  - кривизна стрижня,

$E$  - одинична матриця,

$e$  - безрозмірна координата.

Для нашої задачі необхідно розглядати випадок рівнянь рівноваги просторово-криволінійного стрижня, коли переміщення точок осьової лінії і кути повороту перерізів є великими.

Отже, для розрахунку повітряну лінію траси представляємо у вигляді стрижня із закріпленими кінцями.

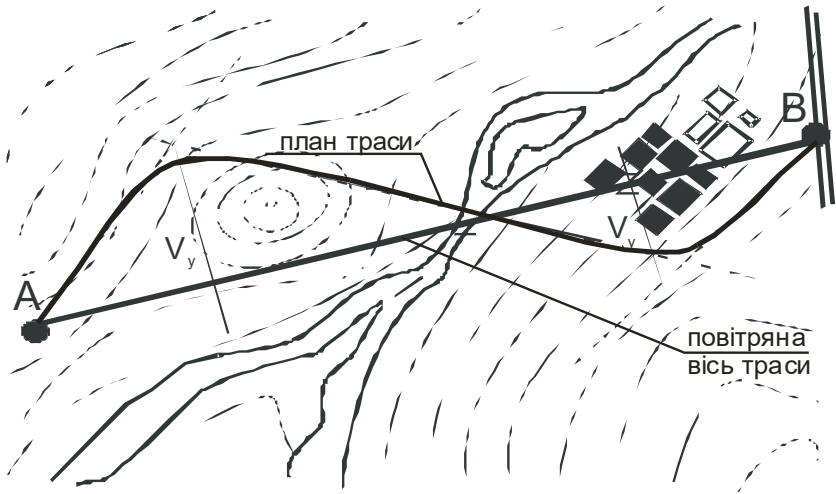


Рисунок 2 - Розміщення моделюючого стержня на карті.  
Контрольні точки в плані.

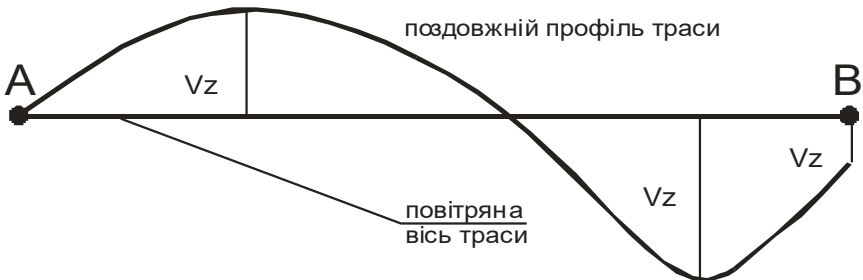
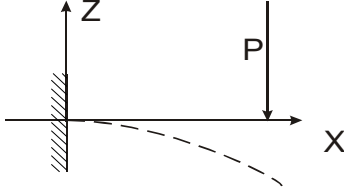
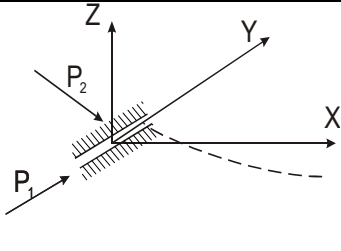


Рисунок 3 - Розміщення моделюючого стержня в профілі.  
Контрольні точки в профілі.

При цьому рельєф може бути представлено як картографічною моделлю в горизонталях (див. рис.3), так і цифровою моделлю місцевості (ЦММ). Найбільш прийнятними в даному випадку є прямокутна та статистична ЦММ.

Умови закріплення кінців стержня (крайові умови) можуть бути різними відповідно до бажаного результату.

**Таблиця 1** - Вплив умов закріплення на можливі переміщення осової лінії стержня

<p>Жорстке заземлення</p> <p>Заборона переміщень по осям <math>X, Y, Z</math> та кутів повороту <math>U_x, U_y, U_z</math></p>	
<p>Шарнірна опора</p> <p>Заборона переміщень по осям <math>X, Y, Z</math></p>	
<p>Шарнірно-рухома опора</p> <p>Заборона переміщень по осям <math>X, Z</math></p>	
<p>Заборона переміщень по осям <math>X, Y</math></p>	

Як видно з табл.1 ми завжди забороняємо переміщення по осі  $x$ , так як прив'язуємось до конкретної точки в плані. По осі  $z$  для другого кінця стрижня - точки  $B$  - переміщення дозволяється, тому що точки  $A$  та  $B$  мають різні відмітки в профілі.

Якщо необхідно задати фіксованим і напрямком на початку або в кінці траси, тоді задаємо ще й кут повороту відповідно в точках  $A$  та  $B$ . Його можна задати

як відносно осі у (в плані), так і відносно осі z (в профілі).

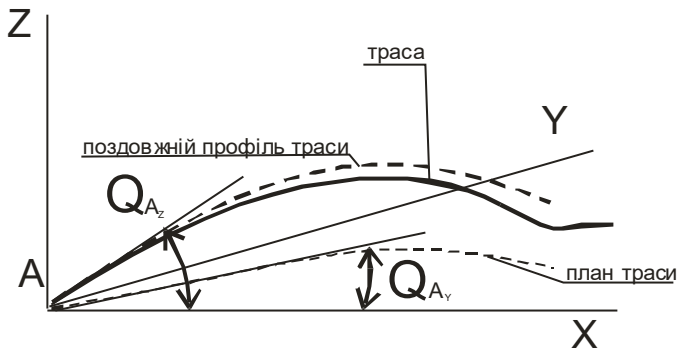


Рисунок 4 - Приклад задавання напрямку траси в плані.

Для моделювання умов рельєфу та інфраструктури використовуємо зовнішнє навантаження на стрижень. Для розрахунку при великих переміщеннях стрижня під дією зовнішніх сил необхідно знати як ведуть себе ці сили в процесі навантаження. В нашому випадку застосовуємо так звані «мертві сили», які залишаються при деформуванні стрижня постійними по напрямку та модулю.

Матриця жорсткостей в рівнянні (1) має вигляд (2) і повинна бути визначеною до початку розрахунків.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Величини  $A_{11}$ ,  $A_{22}$ ,  $A_{33}$  для стрижня залежать від модулів пружності матеріалу стрижня та геометричних характеристик перерізу. Розміри перерізу в нашому випадку не є критичними і можуть бути прийняті рівними 1. А от величини модулів пружності становлять значно більший інтерес. Так дорога I категорії є найменш пружною, так як допустимі значення кривизни для даної категорії є найнижчими. Саме через



призначення величини модулів пружності ми моделюємо категорію дороги, що проектується.

Початкову точку завжди задаємо фіксованою, оскільки здійснюємо відмикання від раніше запроектованої ділянки траси або від існуючої автомобільної дороги. Кінцева точка може не бути так жорстко зафіксована. Потім задаємо ескізне положення траси, намічаючи контрольні точки згідно з вимогами ДБН В.2.4-2000 (місця примикання доріг до існуючих або раніше запроектованих ділянок доріг, місця перетину з автомобільними або залізничними дорогами в одному рівні, місця входу в населені пункти, контури лісів, боліт, високих схилів, які ми оминаємо, тощо. Контрольні точки моделюємо через навантаження, прикладені до осі стержня, зовнішніми силами або фіксованими переміщеннями точок, що лежать на осі (моменти для початку приймаємо рівними 0). Величину вертикального переміщення визначаємо як різницю відміток повітряної лінії (початкової точки) та контрольної, горизонтального - як відстань від повітряної лінії до контрольної точки. (див. рис. 2, 3)

При цьому при задаванні вихідних даних ми можемо використовувати відомі обмеження при визначенні меж смуги варіювання траси в плані та також задавати масиви фіксованих та обмежуючих точок в профілі. За допомогою призначення граничних кутів повороту кінцевих точок стержня, заборони деяких величин переміщень вузлів по осі  $y$  призначаємо межі смуги варіювання траси в плані.

В профілі за допомогою задавання масивів точок (переміщень по осі  $z$ ) задаємо так звані фіксовані точки, що визначаються відмітками проїзної частини мостів і шляхопроводів, автомобільних доріг, відмітками проїзду через населені пункти, та обмежуючі точки, що визначаються заплавами насипів на підходах до мостів, відмітками насипів на болотах, над трубами, відмітками

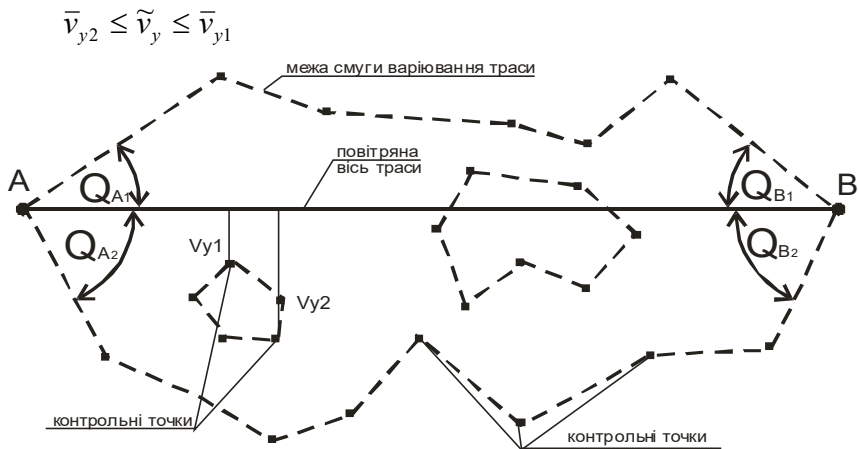


Рисунок 5 - Призначення меж смуги варіювання траси.

точок верху зон з гідрогеологічними умовами, що утруднюють або роблять небажаним проходження проектної лінії нижче цієї зони. В даному випадку для фіксованих і обмежуючих точок:

$$\tilde{v}_z = \bar{v}_z$$

$\bar{v}_z$  - фіксовані переміщення, що відповідають фіксованим та обмежуючим точкам,  $\tilde{v}_z$  - переміщення осі моделюючого стрижня

Нелінійні рівняння рівноваги моделюючого стрижня розв'язуємо методом послідовних навантажень для випадку завантаження «мертвими силами». В результаті статичного розрахунку отримуємо графіки переміщень точок осі, кутів повороту перерізів стрижня.

Кути повороту у вертикальній площині дають нам зміну поздовжнього ухилу. Порівнюючи кути повороту перерізів стрижня та ухил в поздовжньому профілі автомобільної дороги, можна помітити їхню відповідність.

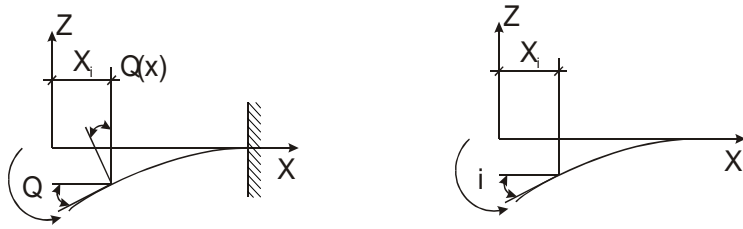


Рисунок 6 - Порівняння кутів повороту перерізу стержня та поздовжнього ухилу.

Як видно з рис.6 дані величини є повністю відповідними. Крім того співпадають і знаки - кут повороту вважається додатнім при повороті перерізу проти годинникової стрілки, ухил також додатній якщо напрямком повороту дотичної до кривої проти годинникової стрілки.

Переміщення дають нам просторове положення зігнутої осі моделюючого стержня, тобто ми одразу, лише намітивши декілька контрольних точок, отримуємо просторову вісь траси, яка проходить через всі задані контрольні точки, що є новим підходом до розрахунку траси автомобільної дороги. Крім суто геометрії траси даний підхід дає нам і можливість розглядати кінематику руху : моделюючи вертикальні і горизонтальні сили, що діють на автомобіль, який рухається, через внутрішні зусилля в стержні (перерізаючі сили, осьова сила, згинальний і крутильний момент), пов'язавши потенційну енергію зігнутого стержня з кінематичною енергією рухомого автомобіля.

Відповідність отриманої просторової кривої вимогам ДБН контролюємо через накладення обмежень на граничні значення кривизни, величин поворотів перерізу (поздовжніх ухилів) та швидкості зміни кривизни, яка визначає швидкість зростання доцентрового прискорення. [4, 5]

Розрахунок повинен вестися інтерактивно та автоматизовано. На кожному етапі розрахунку проектувальник має мати можливість корегувати вихідні умови для отримання найбільш оптимального варіанту траси автомобільної дороги.

Автором намічено реалізувати комп'ютерну програму для застосування даного підходу, яка дозволить негайно відображати результат розрахунку на екрані і дасть можливість проектувальнику контролювати хід розрахунку.

## **Висновки**

1. Актуальним залишається завдання проектування автомобільних доріг із забезпеченням оптимальних транспортно-експлуатаційних властивостей дороги, а отже її плавності.

2. Існуючі сьогодні методи ґрунтуються на роздільному методі проектування плану та поздовжнього профілю автомобільних доріг. Такий підхід має істотні недоліки. Він не дозволяє отримати постійну плавну зміну кривизни траси, не дає гарантованої плавності дороги та безпечних і зручних умов руху.

3. Визначальна роль просторової геометрії траси у питанні отримання оптимальних рішень з точки зору зручності та безпечності руху, її вплив на транспортно-експлуатаційні властивості дороги, будівельну вартість дороги вимагає пошуку такого методу формування траси дороги, який би ґрунтувався на схемі: спочатку трасу саме як просторова крива, потім план і профіль

4. Використання імітаційного проектування дозволить розширити можливості проектувальника у вирішенні задач оптимізації просторового положення траси.

## Література

**1. Филиппов В.В., Величко Г.Г.** Проектирование продольного профиля в CREDO кубическими сплайнами // Автомобильные дороги, №10,2000

**2. Вдовенко А.В., Куліш В.И.** Элементы дифференциальной геометрии трассы автомобильной дороги, изложенные методом подвижного репера. - Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та. 2000.

**3. Батракова А.Г.** Енергозберігаюче трасування автомобільних доріг з урахуванням екологічних і ергономічних вимог системи “людина-автомобіль-дорога-середовище”.05.22.11 - Харківський держ.авт-дор. техн. ун-т.2002р.

**4. Лобанов Е., Поспелов П., Величко Г., Филиппов В.** Конструирование плавных автомобильных дорог с нелинейно меняющейся кривизной // Автомобильные дороги, №4,2002

**5. Лобанов Е., Поспелов П., Величко Г., Филиппов В.** Вирази безпеки. Как совершенствовать СНИП 2.05.02-85 // Автомобильные дороги, №4,2002

**6. Светлицкая В.А.** Механика стержней: Учеб. для вузов. В 2-х ч. ч.1. Статика. - М.: Высш. шк., 1987.