

Є. Ріпецький¹, Р. Ріпецький¹, М. Підгурський², І. Підгурський², О. Коробков¹

Адаптація енергетичних методів до автоматизованих розрахунків рамних конструкцій мобільних машин

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна, erip@i.ua
²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна, pidhurskyv@gmail.com

Показано, що адаптація енергетичних методів до автоматизованого розрахунку рамних конструкцій мобільних машин полягає в розробці єдиного алгоритму придатного до різних конструктивних схем. Відправним пунктом розрахунку залишається отримання виразу потенціальної енергії деформації у вигляді функції з невідомими внутрішніми силовими факторами. Пошук локального мінімуму функції потенціальної енергії деформації здійснено на основі її дискретної grid-поверхні. Досягнуто тактичну гнучкість методу покоординатного спуску при спробах продовжити наближення до локального мінімуму у випадках виникнення ситуації «тупику» шляхом зміни дискретного ходу. Запропоновано поширити реалізований алгоритм від тривимірної поверхні, який розглядає два силових фактори, до n-мірного простору з багатьма невідомими.

Ключові слова: енергетичні методи, рамна конструкція, потенціальна енергія деформації, внутрішні силові фактори, grid-поверхня, метод покоординатного спуску.

Подано до редакції 17.03.2021; прийнято до друку 14.05.2021.

Вступ

Сучасні тенденції інженерного проектування мобільних машин тісно пов'язані із розвитком комп'ютерної техніки та появою нових універсальних прикладних програм. Широке застосування знаходять розрахункові моделі, які здатні суттєво прискорити процеси самих складних розрахунків. Особливо успішно такі моделі використовуються при розрахунках із визначення напружено-деформованого стану (НДС) складних конструктивних структур.

Одним з найбільш навантаженим елементом мобільних машин є рама, яка являє собою просторову несучу металоконструкцію і складається з численних замкнутих контурів. В кожному такому контурі при довільному зовнішньому навантаженні виникає по шість внутрішніх силових факторів, визначення яких з рівнянь статички стає неможливим.

Достатньо ефективним методом розрахунку таких несучих систем є енергетичний метод мінімуму

потенціальної енергії деформації, який дозволяє визначити всі внутрішні силові фактори [1].

Однак, метод передбачає велику кількість аналітичних перетворень, пов'язаних з розкриттям статичної невизначеності рами. Індивідуальна алгоритмізація методу до кожної конструкції рами не дозволяє застосовувати його в повній мірі при автоматизованих розрахунках рамних конструкцій.

Застосування сучасних автоматизованих методів розрахунків рамних конструкцій мобільних машин дозволить суттєво прискорити процеси їх проектування, підвищити надійність машини за рахунок обґрунтованого вибору оптимального варіанту несучої системи.

Розроблені методи можуть бути оформлені у вигляді пакетів прикладних програм з наступною їх реалізацією у САПР для розрахунку та аналізу навантаженості рамних конструкцій.

I. Постановка проблеми

В існуючій практиці проектування рам мобільних машин присутня значна доля ручних операцій при розрахунках їх на міцність, пов'язаних з опрацюванням об'ємних математичних функцій навантажень з розкриттям статичної невизначеності несучих структур. В енергетичному методі при розгляді статично невизначених конструктивних структур основний акцент робиться на отримання виразу потенціальної енергії базових розрахункових схем під дією як зовнішнього навантаження, так і багатьох невідомих внутрішніх силових факторів. Операції з обчислення частинних похідних від загальної потенціальної енергії дозволяють сформулювати систему канонічних рівнянь, яка відповідає кількості невідомих [1-5].

Підінтегральні вирази функцій потенціальних енергій деформації є функціями другого степеня, розв'язок яких класичним методом призводить до об'ємних математичних виразів. З метою спрощення розрахунків для визначення напружено-деформованого стану рамної конструкції під дією зовнішніх навантажень, що виникають під час його експлуатації, пропонується модифікований метод мінімуму потенціальної енергії деформації (ММПЕД). Доведено, що застосування ММПЕД ефективно для плоскої замкнутої рамної конструкції з тонкостінних профілів, навантаженої зусиллями перпендикулярними до площини рами. Ці обставини дозволяють знехтувати енергіями від стиску та зсуву, так як суттєво не впливають на точність результатів [1-5].

Однак, модифікований метод не усуває повністю операції з перетворення об'ємних математичних функцій, а тільки зменшує їх кількість. Крім того, алгоритмізація розрахунку за ММПЕД залежить від конструкції рами, що є перешкодою впровадження наскрізної автоматизації розрахунків при проектування рамних структур.

В той же час, серед альтернативних методи автоматизованого розрахунку рам є методом кінцевих елементів (МКЕ). Переваги МКЕ у порівнянні із традиційними числовими методами полягають у простоті алгоритмізації, можливості повної автоматизації при складанні рівнянь і отримання результатів для достатньо складних комбінованих систем [6]. Результатом такого розрахунку є діаграми розподілу напружень та деформацій в елементах конструкції. Однак, дана методика не дозволяє визначати внутрішні силові фактори. Тому за отриманими діаграмами неможливо визначити роль кожного силового фактору у сумарній картині НДС конструкції [7].

Власне використання енергетичних методів до автоматизованих розрахунків рамних конструкцій мобільних машин дозволить зменшити долю ручних операцій, скоротити терміни проектування рамних конструкцій та перейти до діалогових засобів САПР при пошуку обґрунтованих параметрів несучих систем мобільних машин.

II. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Теоретичні засади застосування енергетичних методів до розрахунку рамних конструкцій здійснено для ряду сільськогосподарських машин, серед яких обприскувачі [1], бурякозбиральні комбайни [2], причіпні розкидачі добрив ПРТ-10 [3], автономні грейферні навантажувачі ПЕА-1,0, ПЕА-1А [4] та ін. Задача вважається розв'язаною, якщо знайдено значення внутрішніх силових факторів. Вважаючи, що розв'язок задачі відповідає умові мінімуму отриманого функціоналу потенціальної енергії деформації U :

$$U(M_1, M_2, \dots, M_i, Q_1, Q_2, \dots, Q_i, N_1, N_2, \dots, N_i, K_1, K_2, \dots, K_i) \rightarrow \min, \quad (1)$$

автори далі діють за однотипною схемою, а саме складають канонічні рівняння для знаходження внутрішніх невідомих силових факторів згинальних моментів M_i , поперечних та поздовжніх сил Q_i та N_i та крутних моментів K_i , які згідно (1) отримують на основі наступних рівностей:

$$\frac{\partial U}{\partial M_i} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial Q_i} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial N_i} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial K_i} = 0. \quad (2)$$

Загальна кількість невідомих визначає ступінь статичної невизначеності розрахункових схем. Автори зводять розрахункові моделі до 8 - 12-ти [1, 2, 4, 5] і навіть до 24-х разів [3] статично невизначених систем за відношенням до внутрішніх силових факторів – згинальних та крутних моментів, перерізуючих сил.

Автоматизація розрахунку в даному випадку можлива лише на останній стадії при розв'язку системи лінійних рівнянь (2) зі знаходження внутрішніх силових факторів. Складність автоматизувати попередні операції з отриманням рівнянь (2) пояснюється особливостями конструктивних структур, кожна з яких вимагає особливих методів підходу.

Автоматизацію розрахунків за ММПЕД може бути здійснено якщо буде розроблено єдиний алгоритм придатний до розрахунку НДС різних рамних конструкцій з використанням умови (1).

Метою роботи є адаптація енергетичних методів до автоматизованого розрахунку НДС рамних конструкцій шляхом розробки єдиного алгоритму зі знаходження внутрішніх силових факторів по завершенню процесу пошуку локального мінімуму функціоналу потенціальної енергії деформації U .

III. Результати досліджень

Розробка алгоритму автоматизованого розрахунку за енергетичними методами доцільно почати з простих конструктивних структур, у яких функція потенціальної енергії залежить тільки від двох силових факторів. Це не тільки спростить

задачу складання алгоритму, але дозволить візуалізувати процеси знаходження внутрішніх силових факторів із застосуванням програмного забезпечення по роботі з тривимірною графікою, наприклад, пакети Surfer, Matlab та ін. [8].

В якості розрахункової схеми обрано один з контурів рами рейферного навантажувача ПЕА-1А «Карпатець» (рис. 1). Даний контур складається з поздовжнього лонжерона – 1. Для підвищення несучої здатності рами в конструкцію рами введено нижню підсилюючу балку – 2. Додаткове підсилення жорсткості контуру здійснено шляхом застосування пластини – 3 (рис. 1а), яка жорстко з’єднує несучі елементи 1 і 2. Лонжерон та нижню підсилюючу балку виготовлено зі стандартних швелерів № 20 (поз.1) та № 14 (поз. 2 рис. 1б).

Розробку алгоритму автоматизованого розрахунку НДС наведеної рамної конструкції запропоновано здійснювати на основі ММПЕД, який передбачає опрацювання виразу потенціальної енергії деформації U . Для цього складено розрахункову схему (рис. 2) з прийнятим навантаженням у вигляді епюри згинаючого моменту M_{z2} (рис. 1в). Це навантаження розподіляється між поздовжнім лонжероном M_{z1} і нижньою підсилюючою балкою M_{z2} , що викликає на ділянці рами CD довжиною l появу внутрішніх силових факторів – згинаючого моменту M та поперечної сили Q (рис. 2).

В такому випадку, потенціальна енергія ділянки рами, епюру навантаження якої показано на рис. 2а, складається з потенціальних енергій лонжерона U_I та нижньої балки U_{II} :

$$U = U_I + U_{II} = \frac{1}{2EJ} \int_0^l M_{z1}^2 dx + \frac{1}{2EJ_2} \int_0^l M_{z2}^2 dx, \quad \text{або}$$

$$U = \frac{1}{2EJ_1} \int_0^l \{M_{z2}(x) - M_{z2}[Q(x), M(x)]\}^2 dx + \frac{1}{2EJ_2} \int_0^l M_{z2}^2 [Q(x), M(x)] dx \quad (3)$$

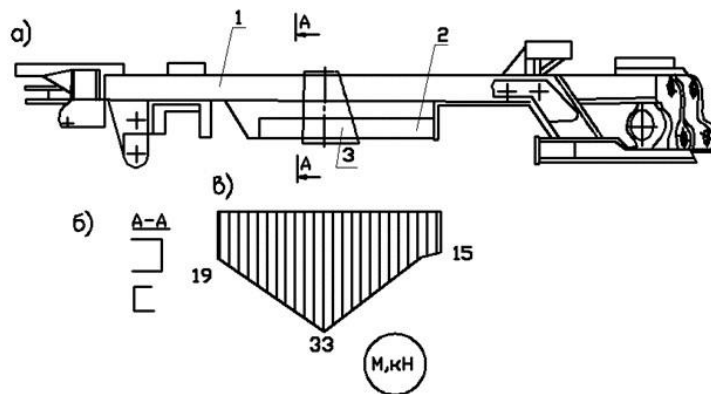


Рис. 1. Рамна структура навантажувача ПЕА-1А «Карпатець». а) рама навантажувача, б) поперечний профіль, в) епюра згинаючого моменту.

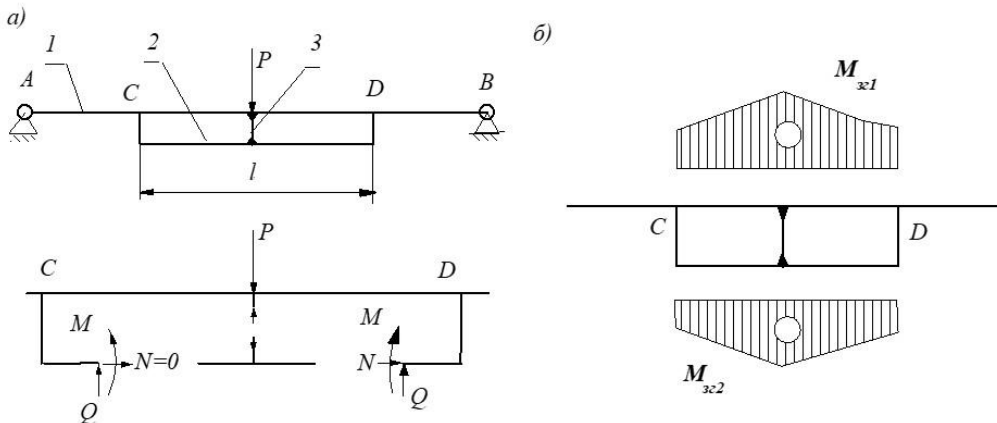


Рис. 2. Розрахункова модель рамної структури: а) дія внутрішніх силових факторів; б) епюра навантаження.

Тобто, вираз потенціальної енергії (3) зведено до залежності від двох змінних силових факторів Q та M , що дозволяє відобразити функцію (3) у вигляді графіка поверхні і візуально перевірити ефективність функціонування алгоритмів зі знаходженням невідомих (рис. 3а). Слід зазначити, що з переходом до автоматизованих методів розрахунку, як правило, цифрове моделювання поверхонь здійснюється у вигляді дискретних значень [9], які можуть бути подані у вигляді таблиць чи матриць. Від виразу потенціальної енергії (1) слід перейти до дискретного функціоналу з локальною точкою мінімуму (рис. 3б). Для зручності опрацювання масив дискретного функціоналу зведено до безрозмірних величин за допомогою коефіцієнта.

В отриманому функціоналі невідомі Q та M виступають як змінні, варіюванням яких потрібно досягнути умову:

$$U(Q, M) \rightarrow \min. \quad (4)$$

На відміну від традиційних методів операції з отримання системи рівнянь (2) будуть відсутні. Натомість, пошук локального мінімуму U_{\min} функції (3) здійснюється за графіком дискретної поверхні (рис. 3б) в координатному просторі внутрішніх силових факторів. Їх знаходження підпорядковано умові (4) і позначено як $Q = Q_m$ та $M = M_m$.

До набору дискретних даних можуть бути застосовані методи повного перебору (сітковий), градієнтний та покоординатного спуску [10-12].

На першому етапі для пошуку локального мінімуму було використано метод повного перебору (сітковий). Його суть полягала в тому, що у межах заданого факторного простору

$$0 \leq Q \leq 20000 \text{ Н}, 0 \leq M \leq 10000 \text{ Нм},$$

в середині якого, як вважаємо, знаходиться локальний мінімум, створюється набір елементів зі значеннями потенціальної енергії у вигляді матриці (сітки). Її елементи розташовані у вузлах сітки через дискретні кроки h_Q та h_M по відношенню до координат Q і M .

Для вказаного факторного простору було

отримано сітку, яка складалася зі 1001 рядків та 2001 стовпчиків. Загальний розмір сітки становив 2003001 значень. Отримана матриця є просторовою, оскільки в межах факторного простору характеризує розподіл модельованої ознаки у вигляді grid-поверхні (рис. 3б), елементи якої крім свого значення характеризуються двовимірним індексом, який чітко прив'язує їх місце розташування в матриці до системи координат факторного простору.

Отримання матриці grid-поверхні потенціальної енергії U вважаємо першим кроком на шляху розробки автоматизованих методів розрахунку рамних конструкцій згідно ММПЕД.

Задачею пошуку мінімального значення величини потенціальної енергії за методом повного перебору (сіткового), полягала у знаходженні в масиві матриці елемента з мінімальним значенням U_{\min} , визначення його двовимірного індексу і відповідно до нього встановлення значень координат внутрішніх силових факторів Q_m та M_m .

За результатами повного перебору знайдено мінімальний елемент матриці зі значенням $U_{\min} = 5206,26$, його місце розташування в матриці – сітці (21рядок і 31стовпець) і встановлено значення невідомих силових факторів $Q_m = 6920 \text{ Н}$ і $M_m = 3810 \text{ Нм}$.

Метод повного перебору достатньо ефективний для автоматизованого розрахунку рамних конструкцій при невеликій кількості невідомих силових факторів. Зі збільшенням їх кількості до 8–12 різкого зростає кількість обчислювальних процедур і, в даному випадку, метод стає неефективним в частині організації діалогу при проєктуванні рам в САПР [12].

Наступним недоліком методу повного перебору є те, що матриця-сітка формується з постійними дискретними кроками h_Q та h_M по координатах Q і M . В цьому випадку підвищення точності пошуку елементів матриці в межах заданого факторного простору, що знов таки негативно впливає на час розв'язку задачі [12].

Необхідність варіюванням кроком сітки впливає із властивостей grid-поверхні. За отриманою сіткою

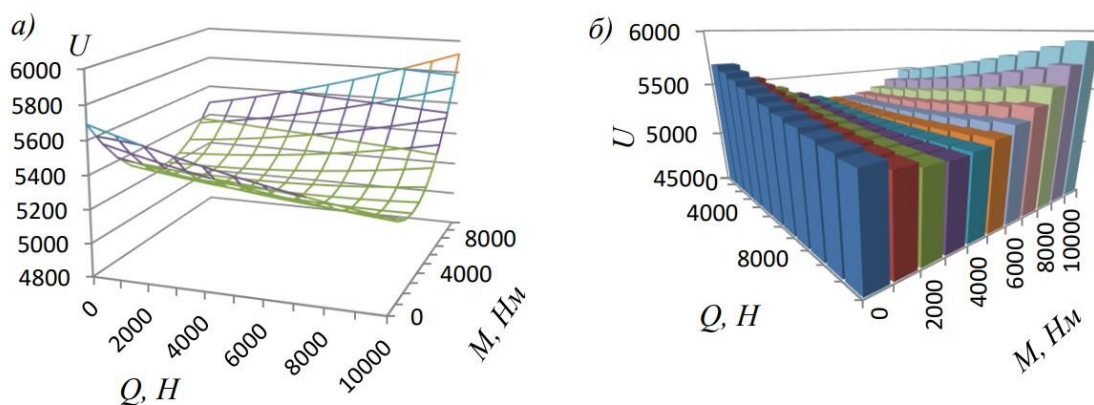


Рис. 3. Поверхні функції потенціальної енергії $U(M, Q)$.

а) неперервна поверхня за формулами (3); б) поверхня у вигляді дискретних даних.

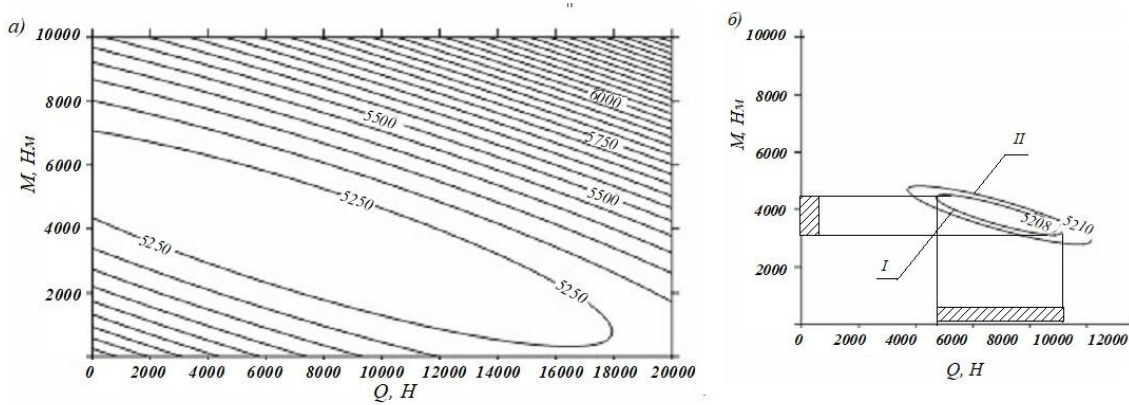


Рис. 4. Ізолінії поверхні функції потенціальної енергії $U(Q, M)$.

а) ізолінії поверхні з інтервалом 50; б) контур мінімуму обмеженого ізолініями 5208 і 5210.

значень показано grid-поверхню потенціальної енергії у вигляді горизонталей – ізоліній з однаковими значеннями U (рис. 4а). З рисунків 3 та 4а видно, що поверхня має форму «жолобу» зі зменшенням крутизни при наближенні до точки мінімуму. Це обумовлює те, що в районі мінімального значення модельованої ознаки з метою локалізації екстремуму необхідно зменшувати крок дискретної сітки. Так, при відхиленні ознаки від мінімального значення U_{\min} до $U = 5208$ (рис. 4б) сила Q може приймати значення, що обмежені контуром I, в діапазоні 5500...8400 Н, а відповідно згинаючий момент $M = 3600...4300$ Нм. При збільшенні ознаки до $U = 5210$ межі стають ще більшими (контур II) $Q = 4000...10000$ Н, а $M = 3200...4700$ Нм (рис. 4б).

Наведений приклад є ілюстрацією того, що крок дискретної сітки при наближенні до точки мінімуму необхідно зменшувати, що дозволить скоротити кількість обчислень при визначенні невідомих Q і M .

В методі повного перебору виконати операції зі зменшенням кроку сітки неможливо, так як наявні логічні процедури порівняння, що використовуються для пошуку мінімального елемента, не враховують градієнт зменшення величини функції.

Спроба використати вирази (2) в якості умови пошуку мінімального значення U_{\min} , приводить до градієнтного методу. Засобами Surfer [8] було отримано grid-поверхню градієнта функції U з координатами $Q = \frac{\partial U}{\partial Q}$ і $M = \frac{\partial U}{\partial M}$. Однак, у зв'язку з

дискретним поданням даних градієнту U точне перетворення в нуль стає неможливим. Воно наближається до нуля з точністю до $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4}$. Тому задача підмінюється пошуком мінімального значення U_{\min} , що описано попереднім алгоритмом. Крім того, отримання додаткової grid-поверхні градієнта ще більше ускладнює процеси розрахунків.

Тому доцільно розробити новий метод автоматизованого розрахунку НДС рамних конструкцій, в основу якого покладено вирішення наступних принципів. Це можливості виконання логічних операцій порівняння значень сусідніх комірок і зміни дискретного кроку при наближенні

до точки локального мінімуму, коли процес пошуку переходить на пологіу поверхню.

Реалізацію цих принципів здійснено в методі покоординатного спуску, який достатньо ефективний у випадках єдиного мінімуму функції [11]. В методі покоординатного спуску, як і в методі повного перебору, використовуються лише числові значення самої функції (3) у вигляді дискретних даних. Особливістю методу є те, що він не потребує побудови grid-поверхні для всього факторного простору, що значно скорочує кількість обчислювальних операцій. Числові значення самої функції (3) записуються у невеликому вікні ковзаючої матриці.

Пошук мінімуму функції U для двох факторів Q і M здійснюється шляхом ковзання вікна матриці розміром 3×3 комірки по grid-поверхні. Значення комірок у вікні заповнюються з кроком h_Q та h_M за текучими координатами Q і M grid-поверхні.

Алгоритм пошуку мінімуму функції полягає у наступному. Матрицю-вікно розміщують на grid-поверхні таким чином, щоб початкова точка C_0 опинилася в центрі матриці – елемент a_{22} . Інші значення матриці розраховуються за формулами (3) з кроками h_Q та h_M в околиці ґрида розміром 3×3 . На основі утвореного масиву 3×3 визначається мінімальний елемент:

$$a_{\min} = \min(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}), \text{ крім елемента } a_{22}. \quad (5)$$

Вікно матриці переміщується по grid-поверхні таким чином, щоб знайдений мінімальний елемент опинився в центрі вікна-матриці. Йому присвоюють індекс і він приймає нове мінімальне значення $a_{22} = a_{\min}$. Інші елементи розраховуються аналогічно за формулами (3) з тими ж кроками h_Q та h_M .

Переміщення матриці-вікна розміром 3×3 можливе у восьми напрямках, які позначено як p, q, r, s, t, u, v, w (рис. 5). Напрямки переміщень можна орієнтувати відносно координатної осі M дирекційним кутом. Кратність дирекційного кута становить $\frac{\pi}{4}$ і він може приймати значення:

$$\frac{\pi}{4} n, \quad \text{де } n = 0 \dots 7. \quad (6)$$

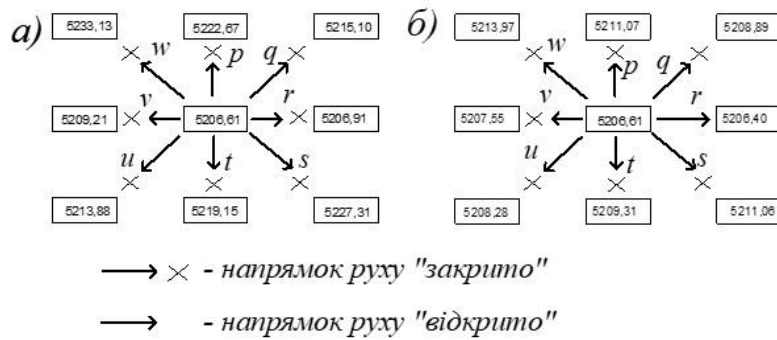


Рис. 5. Напрямки переміщень ковзаючої матриці-вікна по grid-поверхні. а)– ситуація «тупику» ; б) можливість виходу із «тупику».

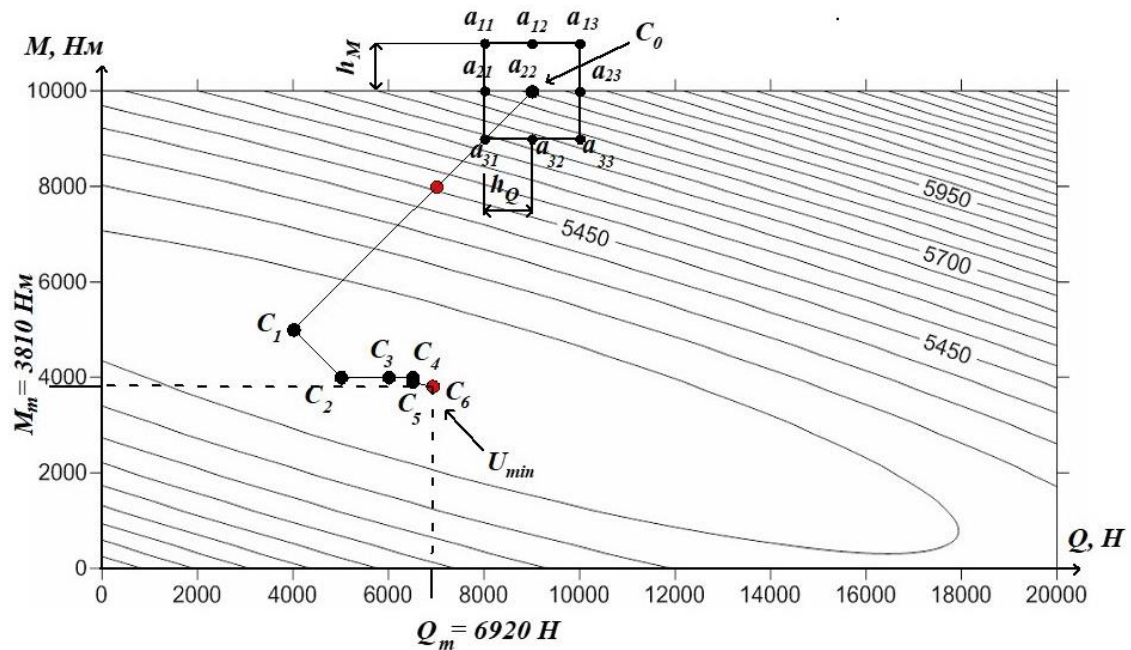


Рис. 6. Робота алгоритму пошуку мінімального значення функції потенціальної деформації U_{min} методом покоординатного спуску.

Розвиток методу покоординатного спуску полягає в тому, що переміщення від початкової точки C_0 до наступної здійснювалось строго у вертикальному або горизонтальному напрямках, тобто при фіксованій однієї із координат [11]. В запропонованому методі можливі додаткові переміщення під кутом кратному $\frac{\pi}{4}$ (6).

Крім того, запропоновано новий алгоритм зміни кроку переміщення. Як вже зазначалось, переміщення ковзаючої матриці відбувається на розмір сітки, яка виступає як крок покоординатного спуску. Переміщення відбувається у сторону меншого елемента, що відповідає умові (5).

Цікавим випадком є ситуація, коли центральний елемент матриці a_{22} буде найменшим елементом, що порушує умову переходу (5). Ще означає, що всі можливі вісім напрямків пересування матриці закрито (рис. 5а). В такому випадку операція спуску опиняється у «тупику», свідченням чого є те, що

матриця наблизилася до локального мінімуму на відстанях по $Q_m \pm h_Q$ та $M_m \pm h_M$. Вихід із «тупика» і подальше пересування матриці-вікна стає можливим, якщо зменшити величини дискретних кроків h_Q і h_M в операціях спуску. Кроки h_Q і h_M можна зменшити, наприклад, у два рази, тоді для всіх крайніх елементів матриці будуть перераховані значення на новий крок (рис. 5б). Перерахунок елементів повертає умову (5) до виконання, і матриця починає рухатися в напрямку мінімального елемента a_{23} , але уже зі зменшеним кроком.

Роботу алгоритму покоординатного спуску проілюстровано на рис. 6. На графіку обрано довільно точку C_0 з початковими значеннями $Q = 10000$ Н і $M = 9000$ Нм. Задача алгоритму полягала в тому, що б досягнути із початкової точки C_0 методом покоординатного спуску таку точку, в якій виконується умова (4) і визначити значення C_m і M_m .

На першому етапі операції спуску було задано величини дискретних кроків

$$h_Q = 1000 \text{ Н і } h_M = 1000 \text{ Нм}$$

по осях Q та M . Процес спуску було розпочато із початкової точки C_0 і за сім кроків досягнуто точку C_2 зі значеннями $Q = 6000$ Н і $M = 4000$ Н. В точці C_2 виникла ситуація «тупику» і процес спуску припинився (рис. 5а). Вихід із «тупика» було здійснено шляхом зменшення кроку до $h_Q = 500$ Н і $h_M = 500$ Нм, що дозволило (рис. 5б) продовжити процес спуску і перейти в точку C_3 зі значеннями $Q = 6500$ Н і $M = 4000$ Н. Від точки C_3 , аналогічно, було здійснено ще три кроки при $h_Q = 100$ Н і $h_M = 100$ Нм з переходом до точки C_4 ($Q = 6700$ Н і $M = 3900$ Нм), а далі з кроками $h_Q = 50$ Н і $h_M = 50$ Нм до точки C_5 , де операція знову опинилася в «тупику». Отримані в точці C_5 значення ($Q = 6800$ Н і $M = 3850$ Нм), засвідчили те, що точка локального мінімуму знаходиться на відстані по осях $Q_m \pm 50$ Н і $M_m \pm 50$ Нм. Тому в точці C_5 знов було зменшено крок до $h_Q = 10$ Н і $h_M = 10$ Нм. Далі ще за одинадцять кроків досягнуто локальний мінімум функції потенціальної $U = U_{\min} = 5206,2577$, якому відповідає значення $Q = Q_m = 6920$ Н і $M = M_m = 3810$ Нм з точністю до значення останнього кроку. Власне такі значення Q_m і M_m було отримано методом повного перебору (сіток). На цьому кроці операцію спуску було припинено, щоб порівняти ефективність описаних двох методів при однакових отриманих результатах.

В методі повного перебору (методом сіток), щоб заповнити всі вузли сітки, необхідно було здійснено 2003001 розрахунків. В методі покоординатного спуску точку локального мінімуму було досягнуто за 27 кроків. На кожному кроці розраховувалися значення матриці вікна розміром 3×3 , тобто дев'ять елементів, і всього за 243 обчислень було отримано кінцевий результат.

Таким чином, метод покоординатного спуску для двох факторів суттєво зменшує кількість обчислень і достатньо ефективний для пошуку невідомих силових факторів згідно умови (4) за ММПЕД. Метод покоординатного спуску має велику тактичну гнучкість, оскільки, якщо виникає ситуація «тупику», то він повертається до найбільш вдалої спроби і змінює крок і напрямок пошуку. Тому метод достатньо пристосований до пошуку глобального оптимуму.

Крім того, даний метод не вимагає знаходження частинних похідних в аналітичному вигляді, оскільки диференціювання збільшує складність завдання і ймовірність помилок при його реалізації.

Описаний алгоритм для тривимірної поверхні, який розглядає лише два фактори, може бути поширений і для n -мірного простору з багатьма невідомими.

Особливо цінним запропонований алгоритм може застосовуватися для автоматизованого розрахунку реальних статично невизначуваних рам з 8 - 12 невідомими внутрішніми силовими факторами.

На відміну від методу повного перебору, який вимагав би побудову сітки для n -вимірного куба, що пов'язано з великою кількістю обчислень, запропонований метод покоординатного спуску дозволить суттєво скоротити обчислення.

На моделі двох факторних змінних доведено стійкість методу покоординатного спуску зі знаходження невідомих внутрішніх силових факторів рамної структури. Алгоритм покоординатного спуску реалізовано на мові програмування Visual Basic Application (VBA) [13] в середовищі Excel.

Висновки

Показано, що адаптація енергетичних методів до автоматизованого розрахунку рамних конструкцій мобільних машин полягає в розробці єдиного алгоритму придатного до різних конструктивних схем. Відправним пунктом розрахунку залишається отримання виразу потенціальної енергії деформації у вигляді функції з невідомими внутрішніми силовими факторами. Пошук локального мінімуму функції здійснено на основі дискретної grid-поверхні, що дозволило замінити операції знаходження частинних похідних на автоматизований метод пошуку локального мінімуму. Дану операцію досягнуто модифікованим методом покоординатного спуску з використанням ковзаючої матриці по grid-поверхні.

Описано роботу алгоритму для рамної конструкції з двома невідомими силовими факторами і показано, що метод пристосований до пошуку глобального оптимуму. Досягнуто тактичну гнучкість методу по-координатного спуску при спробах продовжити наближення до локального мінімуму у випадках виникнення ситуації «тупику» шляхом зміни дискретного ходу.

Запропоновано поширити реалізований алгоритм від тривимірної поверхні, який розглядає два силових фактори, до n -вимірного простору з багатьма невідомими. Даний алгоритм може бути основою при розробці автоматизованих методів розрахунку реальних статично невизначуваних рам з 8 - 12 невідомими внутрішніми силовими факторами.

Ріпецький Є.Й. – д.т.н., доцент, професор кафедри геодезії та землеустрою;

Ріпецький Р.Й. – к.т.н., доцент, доцент кафедри вищої математики;

Підгурський М.І. – професор, д.т.н., професор кафедри інжинірингу машинобудівельних технологій;

Підгурський І.М. – старший викладач кафедри будівельної механіки

Коробков О.Ю. – аспірант.

[1] T.I. Rybak, Search design on the basis of resource optimization of mobile agricultural machines (Zbruch, Ternopil, 2003).

- [2] M.I. Pidhurskyi, Methods for forecasting the life of bearing and functional systems of beet harvesters (TNTU im. I.Puliuia, Ternopil, 2007).
- [3] P. Popovych, M. Stashkiv, T. Dovbush, Scientific Journal of the Ternopil National Technical University 78(2), 153 (2015) (DOI: 10.33108/visnyk_tntu).
- [4] T. Rybak, Ye. Ripetskyi, S. Sikorskyi, Scientific Journal of the Ternopil National Technical University 66(2), 97 (2012) (DOI: 10.33108/visnyk_tntu).
- [5] T.I. Rybak, M.Ia. Stashkiv, Ye.I. Ripetskyi, Journal of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture 69, 85 (2008).
- [6] S.Iu. Eremenko, Eremenko, Finite element Method in the Mechanics of a deformed Body (Osнова, Kharkov, 1991).
- [7] Ye.I. Ripetskyi, R.I. Ripetskyi, V.M. Senychak, Journal of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture 170, 142 (2016).
- [8] Surfer. User's Guide. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers (Golden Software, Inc. Golden, Colorado 2002).
- [9] Ye. Ripetskyi, T. Rybak, O. Ivanchuk, Scientific Journal of the Ternopil National Technical University 70(2), 114 (2013) (DOI: 10.33108/visnyk_tntu).
- [10] A.E. Mudrov, Numerical methods for PC in BASIC, FORTRAN and Pascal (Rasko, Tomsk, 1991).
- [11] Yu. Nesterov, Efficiency of coordinate descent methods for huge-scale optimization problems (CORE Discussion Paper 2010/2, 2010).
- [12] M.A. Volk, T.V. Filimonchuk, R.N. Gredel, Scientific Works of Kharkiv National Air Force University 1(19), 100 (2009).
- [13] R.W. Larsen, Engineering with Excel (Pearson Publishing, 2017).

E. Ripetskyi¹, R. Ripetskyi¹, M. Pidgurskyi², I. Pidgurskyi², O. Korobkov¹

Adaptation of Energy Methods to Automated Calculation of Mobile Machines Frame Constructions

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, ¹Ivano-Frankivsk, Ukraine, erip@i.ua

²Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, pidhurskyi@gmail.com

The paper shows that the adaptation of energy methods to automated calculation of mobile machines frame constructions consists of developing a single algorithm applicable to different construction schemes. The calculation outset still remains the idea of getting a function of potential energy of deformation as a function with unknown inner power factors. Search for local function minimum of potential power of deformation has been based on the function's discrete grid-surface. We managed to reach tactical flexibility of coordinate descent method in an attempt to continue approaching local minimum in cases of a dead end situation by changing the discrete course. The paper suggests extending the implemented algorithm from 3-D surface dealing only with two power factors, to n-D one with many unknown values.

Key words: energy methods, frame construction, potential energy of deformation, inner power factors, grid-surfaces, coordinate descent method.