

ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Черненко Микола Григорович

УДК 624.072.33

**ТЕОРІЯ І МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ
СТАЛЕВИХ СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
ВИРОБНИЧИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків-2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі будівельної механіки і гідравліки Харківської державної академії залізничного транспорту Міністерства транспорту України.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук **Ландау Юрій Олександрович**, ВАТ Укргідропроект, заступник технічного директора;
- доктор технічних наук, професор **Стороженко Леонід Іванович**, Полтавський державний технічний університет імені Юрія Кондратюка, професор кафедри конструкцій з металу, дерева і пластмас;
- доктор технічних наук, професор **Шмуклер Валерій Самуїлович**, Харківська державна академія міського господарства, професор кафедри будівельних конструкцій.

Провідна установа:

- Харківський державний технічний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, кафедра будівельної механіки та кафедра металевих і дерев'яних конструкцій.

Захист відбудеться 25 жовтня 2001 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 при Харківській державній академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків-50, площа Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківської державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків-50, площа Фейербаха, 7.

Автореферат розісланий 21 вересня 2001 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради канд. техн. наук, доцент

Ватуля Г. Л.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стержневі конструкції, виготовлені головним чином із металу, дуже поширені в будівництві, машинобудуванні, на транспорті і в інших галузях народного господарства завдяки значній несучій здатності, надійності роботи, високій індустріальності й збірності. Як показують дослідження, обмеження задач оптимізації конструкцій, особливо статично невизначних систем, характеризуються значними нелінійностями, а самі задачі можуть мати декілька оптимальних розв'язків, які суттєво відрізняються за масою або вартістю. У зв'язку з цим розробка теорії і ефективних методів дослідження і розв'язання багатоекстремальних задач оптимізації сталевих стержневих конструкцій є актуальною проблемою і важливою народногосподарською задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проведені відповідно з планами науково-дослідницьких робіт, які виконувалися кафедрою будівельної механіки і гідравліки Харківської державної академії залізничного транспорту у 1991-1999 рр.: “Определение грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов расчетными пролетами 33, 44, 55 и 66 м проектировки ПСК”, номер державної реєстрації VA01003972P; “Розробка теорії і методів розрахунку сталобетонних конструкцій” – 0196U000644; “Теорія напружено-деформованого та граничних станів при впливі інтенсивних теплових потоків” – 0199U003103.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – розробка теорії і методу розв'язання багатоекстремальних задач мінімізації маси чи вартості сталевих статично невизначних стержневих конструкцій. Об'єктом дослідження є стержневі конструкції виробничих будівель і споруд. Предмет дослідження – багатоекстремальні задачі оптимізації плоских сталевих стержневих конструкцій. Основні задачі дослідження: обґрунтування вибору математичної моделі задач оптимізації статично невизначних стержневих конструкцій; виявлення факторів, які суттєво впливають на число оптимальних розв'язків; зменшення розмірності простору змінних проектування; вивчення властивостей статично невизначних систем, необхідних для врахування при розробці методів їх оптимізації; побудова ефективного методу аналізу чутливості функцій обмежень до змінних проектування; розробка методу розв'язання багатоекстремальних задач; розгляд особливих розв'язків задач оптимізації конструкцій; практичне використання запропонованого методу оптимізації сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд.

Для досягнення поставленої в роботі мети при формулюванні задач мінімізації маси статично невизначних конструкцій використані необхідні ознаки екстремуму. При складанні рівнянь, що описують поведінку системи, використані її властивості інваріантності до обраного простору змінних проектування. Це дало можливість в задачах оптимізації стержневих систем приймати за змінні проектування як площі перерізів стержнів, так і їх моменти інерції або моменти опору. Важливу роль при замінах простору змінних проектування відіграють коефіцієнти спотворення, які водночас є параметрами функціонального зв'язку між геометричними характеристиками перерізів стержнів. При побудові сімейства оптимальних розв'язків, що залежать від параметра, використовуються чисельні методи розв'язання систем нелінійних алгебраїчних рівнянь і теорія біфуркації.

Наукову новизну одержаних результатів складають: виявлена ідентичність між коефіцієнтами спотворення при замінах простору змінних проектування і параметрами функціонального зв'язку між геометричними характеристиками перерізів стержнів; встановлені границі зміни параметрів функціонального зв'язку для найбільш поширених перерізів стержнів; співвідношення між параметрами функціонального зв'язку в різних просторах змінних проектування;– виявлена залежність числа локальних оптимальних розв'язків від параметрів функціонального зв'язку між геометричними характеристиками перерізів стержнів; співвідношення між частинними похідними від функцій обмежень міцності і жорсткості в різних просторах змінних проектування; властивості матриць проектування як в системах з одним зайвим зв'язком, так і в системах з одним ступенем кінематичної невизначеності; практичний спосіб аналізу чутливості внутрішніх сил до змінних проектування й параметрів функціонального зв'язку; дослідження впливу поздовжніх сил на власні значення матриці чутливості внутрішніх сил; дослідження явища розгалуження оптимальних розв'язків, зокрема, в системах з симетрією; метод оптимізації, який використовує властивості статично невизначених систем і дає можливість знайти локальні оптимальні розв'язки, зв'язані між собою через розгалуження.

Практичне значення одержаних результатів. На підставі проведених досліджень розроблено теорію і метод оптимізації статично невизначених стержневих конструкцій, який відрізняється від існуючих тим, що є більш ефективним при розв'язанні багатоекстремальних задач оптимізації. Виходячи з одержаних результатів, з'являється можливість подальшого розвитку і вдосконалення теорії оптимізації статично невизначених стержневих систем в напрямку:

- використання критеріїв оптимальності, що більш наближені до практики проектування;
- практичного використання теоретичних досліджень для оптимізації просторових стержневих систем;
- застосування розробленого методу для оптимізації сталобетонних конструкцій;
- поширення розробленого методу оптимізації на випадок попереднього напруження конструкцій, впливу температури і дії циклічних навантажень.

Розроблений на базі проведених досліджень програмний комплекс використовується в Харківській державній академії залізничного транспорту студентами будівельних спеціальностей при виконанні курсових і дипломних проектів, а також у відділі інженерних споруд колійної служби Південної залізниці при визначенні вантажності прольотних споруд залізничних мостів.

Особистий внесок здобувача. Усі розробки, наведені в дисертації, виконані автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідались і обговорювались на: Українській республіканській науково-технічній конференції “Перспектива розвитку и применения в строительстве металлических конструкций”, м. Дніпропетровськ, 1973 р., Всесоюзній конференції “Проблемы оптимизации в механике твердого деформируемого тела”, м. Вільнюс, 1974 р., Українській республіканській науково-технічній конференції “Современное проектирование и прогрессивная технология изготовления строительных металлоконструкций”, м. Жданов, 1978 р., науково-технічній конференції “Вопросы оптимизации при расчете и проектировании металлических конструкций”, м. Свердловськ, 1981 р., Республіканській науково-технічній конференції “Эффективные

численные методы решения краевых задач механики твердого деформируемого тела”, м. Харків, 1989 р., Всесоюзній конференції “Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте”, м. Ленінград, 1990 р., IV Всесоюзній конференції “Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов”, м. Харків, 1991 р., III Міжнародній конференції “Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте”, м. Санкт-Петербург, 1995 р., II Міжнародній науково-технічній конференції “Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта”, м. Москва, 1996 р., V Міжнародній науково-практичній конференції “Современные проблемы геометрического моделирования”, м. Мелітополь, 1998 р., IV Міжнародній конференції “Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте”, м. Санкт-Петербург, 1999 р., Республіканському міжвузівському науково-методичному семінарі з опору матеріалів і будівельної механіки, м. Київ, 1984 р., семінарі “Междисциплинарные исследования и оптимизация в задачах математической физики”, м. Харків, 1991 р., щорічних науково-технічних конференціях Харківського інституту інженерів залізничного транспорту в 1972-1993 р.р. та Харківської державної академії залізничного транспорту в 1994-2000 р.р.

Публікації. Результати досліджень опубліковані в 42 наукових працях, в тому числі в 4 науково-технічних журналах, 18 збірниках наукових праць, 1 інформаційному листку, в 14 матеріалах і тезах доповідей конференцій, в 5 депонованих наукових працях.

Обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, восьми розділів, висновків, списку з 203 найменувань використаних літературних джерел й додатку. Загальний обсяг дисертації 382 сторінки, в тому числі 336 сторінок основного тексту, 60 рисунків, 20 таблиць.

Автор висловлює вдячність своєму науковому консультанту доктору технічних наук, професору Е. Д. Чихладзе за допомогу в підготовці дисертаційної роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У першому розділі дисертації наведено короткі історичні відомості про становлення і основні етапи розвитку теорії оптимізації сталевих стержневих конструкцій. Відомі три принципи, які покладені в основу проектування таких конструкцій: економія металу, зниження трудомісткості виготовлення, скорочення термінів монтажу, в різні часи враховувались по різному в залежності від стану розвитку промисловості і нагальних потреб суспільства, а також наявних методів розрахунку споруд. До появи сучасних методів оптимізації були розроблені способи визначення маси в залежності від проектних параметрів конструкцій. Тут, передусім, треба відзначити наукові праці М. С. Стрілецького та його учнів. Одночасно були розроблені і окремі підходи до оптимізації конструкцій. Відзначаються основоположні праці О. І. Виноградова, І. М. Рабіновича, Ю. А. Радціга, К. М. Хуберяна, А. П. Філіна та інших авторів.

Сучасна епоха оптимізації будівельних конструкцій розпочалася більш ніж п'ятдесят років тому з обґрунтування доцільності застосування в цій області недавно розроблених методів математичного програмування. Суттєвий внесок у розвиток методів оптимізації конструкцій зробили вітчизняні та зарубіжні вчені Н. П. Абовський, М. В. Банічук, В. П. Валуйських, Г. І. Гребенюк, В. М. Гордєєв, І. Б. Лазарев, В. П. Малков, В. А. Пермяков, Ю. М. Почтман, М. М. Складнев, В. В. Трофімович, І. С. Холопов, В. М. Шимановський, О. В. Шимановський, В. С. Шмуклер, J. S. Arora, A.

Brandt, K. K. Choi, D. E. Grierson, E. J. Haug, W. H. Lee, K. I. Majid, G. I. N. Rozvany, W. Prager, R. T. Schield, L. A. Schmit, Z. Wasiutynski та багато інших.

Аналізуються основні напрямки та особливості розв'язання багатоекстремальних задач. Значний внесок в становлення і розвиток цих напрямків зробили В. І. Гемінтерн, А. О. Жиглявский, І. Б. Моцкус, Л. А. Растрингін Р. Г. Стронгін, В. К. Чичинадзе, М. С. Штільман, К. S. Fu, G. J. McMurtry та ряд інших. Відзначається, що більшість з існуючих методів розв'язання багатоекстремальних задач базується на статистичних методах пошуку і нема гарантії, що всі локальні розв'язки будуть знайдені.

Наведено загальний підхід до розв'язання задач оптимізації плоских статично невизначних стержневих систем, який базується на використанні необхідних ознак Куна-Такера. Розглянуто приклади багатоекстремальних задач оптимізації статично невизначних балок і рам, завантажених нерухомим навантаженням, попереднім напруженням та їх комбінацією. Наведено приклади впливу дискретної зміни перерізів стержнів, властивостей симетрії конструкції та інших факторів на число оптимальних розв'язків. Показано, що серед обмежень на напружено-деформований стан конструкцій обмеження за нормальними напруженнями породжують найбільше число локальних оптимальних розв'язків. Виходячи з аналізу впливу окремих факторів на кількість локальних екстремумів в задачах оптимізації статично невизначних стержневих систем, в подальшому розглядаються, головним чином, задачі мінімізації маси або вартості конструкцій з урахуванням обмежень за першим і другим граничними станами.

У другому розділі вводиться поняття параметрів функціонального зв'язку між геометричними характеристиками перерізу стержнів. У загальному випадку обмеження за першим граничним станом є функціями моментів інерції, моментів опору і площ перерізів стержнів. Якщо увести функціональний зв'язок між моментом інерції і площею $I_i = I_i(A_i)$, а також між моментом опору та площею $W_i = W_i(A_i)$ для кожної змінної проектування, ці обмеження у просторі площ перерізів стержнів набувають вигляду $f_j(A_1, \dots, A_n) \leq 0$. На функціональний зв'язок між геометричними характеристиками перерізів не накладається ніяких обмежень, крім задоволення теореми про неявну функцію. Уводячи аналогічні перетворення, можна дістати умови міцності в просторі моментів опору та в просторі моментів інерції перерізів стержнів.

Формули для частинних похідних від функцій обмежень міцності мають вигляд:

– у просторі площ:

$$\frac{\partial f_j}{\partial A_i} A_i = \sigma_{jm} \left(\frac{\partial M_j}{\partial A_i} \frac{A_i}{M_j} - \delta_{ij} \zeta_i \right) + \sigma_{jn} \left(\frac{\partial N_j}{\partial A_i} \frac{A_i}{N_j} - \delta_{ij} \right);$$

– у просторі моментів опору:

$$\frac{\partial f_j}{\partial W_i} W_i = \sigma_{jm} \left(\frac{\partial M_j}{\partial W_i} \frac{W_i}{M_j} - \delta_{ij} \right) + \sigma_{jn} \left(\frac{\partial N_j}{\partial W_i} \frac{W_i}{N_j} - \delta_{ij} \eta_i \right);$$

– у просторі моментів інерції:

$$\frac{\partial f_j}{\partial I_i} I_i = \sigma_{jm} \left(\frac{\partial M_j}{\partial I_i} \frac{I_i}{M_j} - \delta_{ij} \chi_i \right) + \sigma_{jn} \left(\frac{\partial N_j}{\partial I_i} \frac{I_i}{N_j} - \delta_{ij} \kappa_i \right),$$

де σ_{jm} і σ_{jn} – частки напруження відповідно від дії згинального моменту та поздовжньої сили;

δ_{ij} – символ Кронекера.

Ці формули містять параметри функціонального зв'язку першого порядку між геометричними характеристиками перерізу i -го стержня

$$\varsigma_i = \frac{\partial W_i}{\partial A_i} \frac{A_i}{W_i}, \quad \eta_i = \frac{\partial A_i}{\partial W_i} \frac{W_i}{A_i}, \quad \chi_i = \frac{\partial W_i}{\partial I_i} \frac{I_i}{W_i}, \quad \kappa_i = \frac{\partial A_i}{\partial I_i} \frac{I_i}{A_i}.$$

У третьому розділі вивчаються властивості статично невизначних стержневих систем, які в подальшому використовуються при побудові алгоритму оптимізації. Показується, що деякі з властивостей статично невизначних систем тісно зв'язані з властивостями відповідних матриць проектування. Так, внутрішні сили в статично невизначній системі при розрахунках на одне навантаження обчислюються за формулою

$$S = (E - \hat{S})S_f,$$

де \hat{S} – матриця проектування: $\hat{S} = \bar{S}(\bar{S}^T B \bar{S})\bar{S}^T B$;

\bar{S} – матриця внутрішніх сил в статично визначній основній системі від одиничних значень зайвих невідомих;

S_f – стовпець внутрішніх сил в статично визначній основній системі від заданого навантаження;

B – матриця податливостей стержнів системи.

Будова матриці \hat{S} залежить від прийнятої апроксимації внутрішніх сил на ланках системи, для чого застосовуються, головним чином, інтерполяційні поліноми Лагранжа.

Запроваджується поняття навантажень, асоційованих з матрицями проектування.

Довільний стовпець матриці $E - \hat{S}$, наприклад, i -й, трактується як стовпець внутрішніх сил від узагальненого навантаження \bar{F}_i . Характер навантажень \bar{F} залежить від прийнятої апроксимації внутрішніх сил на ланках стержнів. У випадку лінійної апроксимації навантаженням є самоврівноважена система вантажів у вигляді двох зосереджених сил та моменту. При квадратичній апроксимації крім зосереджених сил і моменту на стержень діє рівномірно розподілене навантаження. Оскільки стовпці матриці $E - \hat{S}$ є її власними векторами, навантаження, асоційовані з матрицею $E - \hat{S}$, називаються власними навантаженнями.

У четвертому розділі викладено основні положення аналізу чутливості внутрішніх сил і переміщень в статично невизначних стержневих системах до змінних проектування й параметрів функціонального зв'язку. Зокрема, в просторі моментів інерції формула для обчислення першої частинної похідної від стовпця внутрішніх сил S за i -ю змінною проектування має вигляд

$$\frac{\partial S}{\partial I_i} I_i = \hat{S} S_i,$$

де S_i – модифікований стовпець внутрішніх сил: $S_i = K(I_i)S$.

Матриця $K(I_i)$ має таку структуру:

$$K(I_i) = \text{diag}\{0, \dots, 0, 1, 1, 1, \kappa_i, 0, \dots, 0\}.$$

Аналогічно уводиться поняття модифікуючих матриць і в інших просторах змінних проектування.

Частинна похідна першого порядку від стовпця внутрішніх сил за параметром ψ_i має вигляд

$$\frac{\partial S}{\partial \psi_i} = \hat{S}K(\psi_i)S,$$

де $K(\psi_i)$ – модифікуюча матриця.

Запропоновано практичний спосіб аналізу чутливості внутрішніх сил і переміщень у статично невизначних конструкціях, який не потребує модернізації існуючих скінченно-елементних програм розрахунку стержневих систем. Шляхом елементарних перетворень формулу для $\frac{\partial S}{\partial I_i} I_i$ можна привести до вигляду

$$\frac{\partial S}{\partial I_i} I_i = S_i - \tilde{S},$$

згідно з якою величина частинної похідної дорівнює різниці між модифікованим стовпцем S_i і стовпцем внутрішніх сил \tilde{S} від навантаження, що викликає внутрішні сили S_i . При цьому частинні похідні від переміщень дорівнюють взятим зі зворотним знаком переміщенням від навантаження, що відповідає модифікованому стовпцю S_i .

У п'ятому розділі вивчаються спектральні властивості матриці частинних похідних від функцій обмежень міцності. Розглядаються ознаки Куна-Такера із врахуванням виразів для частинних похідних від функцій обмежень міцності в просторах площ, моментів опору та моментів інерції перерізів стержнів. При заміні простору змінних проектування ці ознаки перетворюються згідно з коваріантним законом, а множники Лагранжа u_i при таких перетвореннях є інваріантами. Враховуючи особливості обчислення частинних похідних від внутрішніх сил, в подальшому розглядаються ознаки Куна-Такера у просторі моментів опору з обчисленням частинних похідних у просторі моментів інерції перерізів стержнів

$$(P^T \Psi - E)u + Ng = 0,$$

де P – квадратна матриця з елементами $p_{ij} = \frac{\partial M_j}{\partial I_i} \frac{I_i}{M_j}$; Ψ і N – діагональні

матриці параметрів функціонального зв'язку між моментом інерції й моментом опору та між площею й моментом опору перерізів стержнів: $\Psi = \text{diag}\{\psi_1, \dots, \psi_n\}$,

$N = \text{diag}\{\eta_1, \dots, \eta_n\}$; u – вектор множників Лагранжа: $u^T = (u_1, \dots, u_n)$; g – вектор частинних похідних від функції цілі за змінними проектування в просторі логарифмів площ перерізів стержнів: $g^T = (g_1, \dots, g_n)$.

Досліджено деякі властивості матриці P , головним чином, її спектральні властивості. Встановлено, зокрема, що в системах з одним зайвим зв'язком при дії власного навантаження єдине ненульове власне значення матриці P не перевищує одиниці. Розглядається дія на систему з одним зайвим зв'язком лінійної комбінації власних навантажень. У цьому випадку власне значення матриці P може перевищувати одиницю, а при зміні розрахункового перетину має місце стрибок в його величині. Встановлено, що для деяких конструкцій серед власних значень матриці P можуть бути кратні значення.

Досліджена поведінка власних значень матриці P у загальному випадку при одночасній дії як згинальних моментів так і поздовжніх сил. Якщо при неврахуванні поздовжніх сил матриця P має кратні власні значення, то при їх врахуванні вона має лише прості власні значення.

У шостому розділі наводиться алгоритм оптимізації статично невизначних стержневих конструкцій, який базується на використанні методу продовження розв'язку за параметром. Показано, що при застосуванні цього методу найбільш зручним простором змінних проектування є простір моментів опору перерізів стержнів. Параметр уводиться в функціональний зв'язок між геометричними характеристиками перерізів за схемою $\psi_i = t\psi_{i0}$, де ψ_{i0} – значення параметра функціонального зв'язку для оптимального сортаменту.

Для будь-якого значення параметра t розв'язок задачі називається дискретно рівномісним (рівномісним), якщо для кожної змінної проектування знайдеться ланка системи з перетином, де умова міцності за нормальними напруженнями буде виконуватися як строга рівність.

При $t = 0$ відносні моменти опору обчислюються за формулою

$$w_{0j} = \frac{|M_j|}{2W_{0j}R_j} + \sqrt{\left(\frac{|M_j|}{2W_{0j}R_j}\right)^2 + \frac{|N_j|}{\varphi_j A_{0j}R_j}}.$$

У випадку позацентрово розтягнутих стержнів $\varphi_j = 1$ і розв'язок для w_{0j} одержується в замкнутій формі. Для позацентрово стиснутих стержнів визначення коефіцієнта φ_j в загальному випадку є утрудненим. Тому при наявності таких стержнів розрахунок конструкції ведеться за деформованою схемою і тоді нема потреби в визначенні коефіцієнтів φ_j .

На кожному кроці ітеративного процесу робиться перевірка на невід'ємність множників Лагранжа та обчислюється наступне наближення. Якщо одержане наближення порушує обмеження міцності для деяких стержнів, то для його уточнення застосовується ітеративний процес Ньютона

У випадку, коли в процесі продовження оптимального розв'язку за параметром виявляється, що для деяких перетинів $u_j \leq 0$, подальший розрахунок ведеться за схемою для нерівномісних систем. В цьому випадку замість обмежень міцності розглядаються ознаки доповнюючої нежорсткості $f_j u_j = 0$ для $j = 1, \dots, n$.

Обмеження на переміщення вузлів конструкції враховуються після визначення оптимального розв'язку при розгляді лише обмежень міцності, причому цей розв'язок приймається за початкове наближення. Після цього обчислюється уточнене значення стовпця змінних проектування і проводиться перерахунок напружено-деформованого стану конструкції. Для виходу на границю допустимої області досить виконати лише декілька ітерацій. Оскільки рух робочої точки відбувається вздовж променя, який виходить з початку координат, то обмеження на напружений стан системи при цьому не будуть порушені. Щоб одержаний таким шляхом розв'язок був оптимальним, треба ще задовольнити ознакам Куна-Такера. Для уточнення розв'язку використовується метод Ньютона. За початкове наближення для множників Лагранжа приймається $u_{j0} = 0$.

Для зменшення числа уточнень оптимального розв'язку в процесі його продовження за параметром застосовується схема обчислень з використанням екстраполяційних формул Адамса-Башфорта. Порівняння з методом Ейлера показує, що для більшості задач оптимізації статично невизначних балок і рам при використанні цих формул число уточнень зменшується майже вдвічі.

У сьомому розділі розглянута біфуркація рівномісних оптимальних розв'язків. Розмірність біфуркаційної задачі визначається як коранг матриці чутливості. Наводяться

прикладі одноповерхових багатопрольотних статично невизначних рам, для яких цей коранг досягає $n - 1$, тобто може бути досить великим.

Досліджено одновимірний та багатовимірний випадки біфуркації оптимального розв'язку. Наводяться приклади одновимірної біфуркації оптимального розв'язку при переході від рівномірної статично невизначної системи до нерівномірної, а також в системах з симетрією. Досліджується вплив поздовжніх сил в рамах на число оптимальних розв'язків.

Розглянуто приклад біфуркації оптимального розв'язку в однопрольотній одноповерховій рамі з обмеженнями на деформований стан. Біфуркаційне значення параметра виявилось таким, як і при врахуванні лише обмежень на напружений стан рами.

Наводяться результати мінімізації маси поперечної рами одноповерхової двопрольотної будівлі типу "Молодечно" на дію горизонтальної сили із зовнішнім моментом 250 кН·м, прикладеної на рівні ригеля. В результаті оптимізації було виявлено сім локальних оптимальних розв'язків. Загальна теоретична площа перерізів колон склала: для першого локального розв'язку 146.52 см², для другого, третього і четвертого – 135.03 см², для п'ятого, шостого і сьомого – 115.01 см².

У восьмому розділі розглядаються приклади розв'язання деяких задач оптимізації статично невизначних конструкцій запропонованим методом. Наводяться дві тестові задачі мінімізації маси статично невизначних рам: однопрольотна двоповерхова рама і двопрольотна шестиповерхова рама. Розрахунок кожної із рам проводився на два завантаження.

Для першої рами оптимальний розв'язок в процесі його продовження за параметром залишався рівномірним. Співставлення одержаних результатів з відомими розв'язками виявило практичне їх співпадання як за величиною маси так і за значеннями геометричних характеристик перерізів стержнів. Для другої рами оптимальний розв'язок в процесі продовження його за параметром при $t = 0.7$ став нерівномірним, а при $t = 1$ знову виявився рівномірним. Порівняння цього розв'язку з відомим з літературних джерел показало їх практичне співпадання за теоретичною масою. Але порівнювані розв'язки суттєво відрізняються за значеннями геометричних характеристик перерізів стержнів. Це вказує на існування в допустимій області даної задачі не менше двох локальних оптимальних розв'язків.

Наведено приклад мінімізації маси сталюого поперечника рами однопрольотної одноповерхової промислової споруди. Розглянуто два варіанти розрахункових схем ригеля: абсолютно жорсткий стержень і ферма. В першому варіанті досліджено два випадки функціонального зв'язку між геометричними характеристиками надкранової і підкранової частин колон. Коли цей зв'язок відповідав сортаменту типізованих колон серії 1.424-4, теоретична маса рами в оптимальному розв'язку практично співпала з проектною при деякому зменшенні площ перерізів надкранової частини і збільшенні площ перерізів підкранової частини колон. У випадку використання для надкранової частини колон функціональних залежностей, які відповідають оптимальним перерізам, добраним в частині забезпечення міцності і стійкості згідно з вимогами СНиП II-23-81, теоретична маса рами була зменшена на 3.9%. В другому варіанті ригеля спостерігалось збільшення майже на 25% маси колон при незначному збільшенні маси ферми покрівлі.

Проведена мінімізація маси головної балки нерозрізного сталюого автодорожнього моста довжиною 3×89.25 м. Проект моста розроблено лабораторією спорудження мостів НИЦ "Мосты" ЦНИИС м. Москва у 1992 році. В проекті

використано уніфіковані елементи й вузли, запропоновані проектним інститутом Ленгінпротрансмот. Теоретична маса конструкції до і після оптимізації виявилася практично однаковою.

В додатках до дисертації наведено опис програми мінімізації маси плоских статично невизначних стержневих конструкцій і акти впровадження.

ВИСНОВКИ

1. Обмеження на напружено-деформований стан статично невизначних стержневих конструкцій мають значні нелінійності. Тому задачі оптимізації таких систем можуть мати декілька локальних оптимальних розв'язків. Існуючі підходи до визначення числа розв'язків неопуклих задач оптимізації носять або статистичний характер або пов'язані з побудовою областей тяжіння окремих локальних розв'язків, що потребує значних обчислень.
2. Факторами, що впливають на виникнення локальних оптимальних розв'язків, є функціональний зв'язок між геометричними характеристиками перерізів стержнів, дискретність зміни розмірів перерізів, попереднє напруження конструкції, наявність поздовжніх сил, симетрія конструкції.
3. Порівняльний аналіз формулювань задач оптимізації статично невизначних стержневих систем у просторах моментів інерції, моментів опору та площ перерізів стержнів показує, що в кожному з цих просторів існують параметри функціонального зв'язку між геометричними характеристиками перерізів стержнів. При заміні простору проектування частинні похідні від функцій обмежень міцності перетворюються за коваріантним законом, де питомими коефіцієнтами спотворення є параметри функціонального зв'язку.
4. Для більшості перерізів зв'язок між моментом інерції, моментом опору та площею можна представити степеневими функціями. Показники степеня в цих залежностях є параметри функціонального зв'язку. Якщо відношення величини радіуса інерції перерізу до його висоти є стала величина, число параметрів, що характеризують функціональний зв'язок між геометричними характеристиками, зменшується до одного.
5. Узагальнення теореми Коші про середнє значення на випадок декількох інтервалів дає можливість дістати емпіричні формули для функціональних залежностей між геометричними характеристиками перерізів найбільш поширених сортментів.
6. Від величини параметрів функціонального зв'язку між геометричними характеристиками перерізів залежить вигляд допустимої області та ліній рівня функції цілі. При наявності структурно нестійких обмежень міцності при певних значеннях параметрів відбувається значна топологічна перебудова допустимої області з появою або зникненням додаткових локальних оптимальних розв'язків.
7. Використання поняття складових конструкцій дає можливість в явній формі оцінити вплив жорсткостей перерізів на розподіл внутрішніх сил в статично невизначних системах, що значно спрощує аналіз їх чутливості до змінних проектування, а також обчислення власних значень.
8. За допомогою матриць проектування і модифікуючих матриць формули для аналізу чутливості внутрішніх сил одержано у вигляді, зручному для їх обчислення з використанням будь-якої скінченно-елементної програми розрахунку статично невизначних конструкцій.
9. Запропонований метод мінімізації маси чи об'єму конструкцій, який використовує необхідні ознаки екстремуму та метод продовження розв'язку за параметром, не

потребує додаткових обчислень, зв'язаних з визначенням напрямку спуску. Зазначений метод враховує обмеження по несучій здатності і деформативності конструкцій і в процесі оптимізації охоплює як випадок рівномічних так і нерівномічних оптимальних розв'язків.

10. Якщо при продовженні за параметром його значення знаходиться на спектрі матриці чутливості внутрішніх сил, виникає біфуркація оптимального розв'язку. Біфуркація була виявлена при переході оптимального розв'язку від рівномічного до нерівномічного, а також в системах з симетрією при врахуванні обмежень як на напружений так і на деформований стан конструкцій. В деяких конструкціях перехід від рівномічного до нерівномічного розв'язку спостерігався раніше, ніж його біфуркація.
11. На число локальних оптимальних розв'язків в статично невизначних рамах суттєво впливають поздовжні сили. При збільшенні рівня поздовжніх сил вірогідність наявності в допустимій області декількох локальних оптимальних розв'язків зменшується.
12. Наведені приклади мінімізації маси двох тестових задач вказують як на задовільний збіг результатів оптимізації так і на можливість виявлення раніше невідомих додаткових оптимальних розв'язків.
13. Приклади оптимізації важливих з практичної точки зору будівельних конструкцій показують ефективність запропонованого методу, можливість використання широкого асортименту типізованих елементів.
14. Аналіз оптимальних розв'язків деяких одноповерхових рам вказує, що використання при їх оптимізації спрощених розрахункових схем потребує належного обґрунтування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Черненко Н. Г. Об одном алгоритме решения многоэкстремальных задач проектирования оптимальных конструкций // Вопросы оптимизации тонкостенных силовых конструкций. – Харьков: ХАИ, 1975. – Вып. 1. – С. 104-106.
2. Черненко Н. Г. К вопросу оптимизации стержневых систем с преобладающим изгибом // Исследование современных конструктивных форм и методов расчета мостовых конструкций. – М.: МИИТ, 1978. – Вып. 599. – С. 98-103.
3. Черненко Н. Г. О бифуркации равнопрочных решений в задачах оптимизации систем с преобладающим изгибом // Повышение эффективности использования конструкционных материалов на железнодорожном транспорте. – Харьков: ХИИТ, 1987. – Вып. 3. – С. 36-41.
4. Черненко Н. Г. Об одном представлении матрицы инвариантов статически неопределимых стержневых систем // Повышение эффективности использования конструкционных материалов на железнодорожном транспорте. – Харьков: ХИИТ, 1987. – Вып. 3 – С.42-47.
5. Черненко Н. Г. Составляющие конструкции в задачах оптимизации статически неопределимых стержневых систем // Вопросы обеспечения экономичности и эксплуатационной надежности конструкций транспортных сооружений. – Харьков: ХИИТ, 1993. – Вып. 21. – С.73 -78.
6. Черненко Н. Г. Исследование семейств решений в задачах оптимизации статически неопределимых стержневых систем // Совершенствование методов расчета и

- проектирования конструкций и сооружений. – Харьков: ХарГАЖТ, 1996. – Вып. 27. – С. 39-53.
7. Черненко Н. Г. О чувствительности ограничений к изменению параметров функциональной связи между геометрическими характеристиками поперечных сечений стержней // Совершенствование методов расчета и проектирования конструкций и сооружений. – Харьков: ХарГАЖТ, 1996. – Вып. 27. – С. 54-57.
 8. Черненко Н. Г. К анализу чувствительности первого и второго порядка в задачах оптимизации статически неопределимых стержневых систем // Создание новых композиционных материалов и повышение эксплуатационной надежности и сроков службы конструкций и сооружений на железнодорожном транспорте. В 2 т. Т. 2. – Харьков: ХарГАЖТ, 1995. – Вып. 26. – С.81-89.
 9. Черненко Н. Г. Об одном подходе к решению многоэкстремальных задач оптимизации конструкций. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1997. – №4. – С.10-13.
 10. Черненко Н. Г. Некоторые особенности применения метода продолжения решения по параметру в задачах оптимизации конструкций. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1998. – №2. – С.7-12.
 11. Черненко Н. Г. О модифицирующих матрицах в анализе чувствительности при проектировании конструкций // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 1998. – № 4. – С.50-54.
 12. Черненко Н. Г. Использование конечно-элементных программ при анализе чувствительности конструкций // Залізничний транспорт України. – 1998. – №2–3. – С.41-42.
 13. Черненко Н. Г. О чувствительности внутренних сил к параметрам функциональной связи между геометрическими характеристиками поперечных сечений // Коммунальное хозяйство городов: Науч. техн. сб., – Вып. 16. –К.: Техніка, 1998. – С.39-43.
 14. Черненко Н. Г. Бифуркация решений в многоэкстремальных задачах оптимизации конструкций // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –1999. – №1. – С.53-59.
 15. Черненко М. Г. Спектральні властивості матриці чутливості внутрішніх сил у статично невизначних системах // Підвищення ефективності технології та техніки для виконання вантажно-розвантажувальних, будівельних і колійних робіт на залізничному транспорті. – Харків: ХарДАЗТ, 1999. – Вып. 36. – С.24-30.
 16. Черненко М. Г. Деякі властивості функціональних залежностей між геометричними характеристиками перерізів стержнів // Коммунальное хозяйство городов: Науч. техн. сб., – Вып. 19. – К.: Техніка, 1999. – С.70-74.
 17. Черненко Н. Г. О структурной неустойчивости ограничений задач оптимизации конструкций // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 1999. – № 6. – С.46-50.
 18. Черненко М. Г. Визначення параметрів функціонального зв'язку між геометричними характеристиками перерізів з сортаменту// Коммунальное хозяйство городов: Науч. техн. сб., – Вып. 20. – К.: Техніка, 1999. – С.154-157.
 19. Черненко М. Г. Деякі властивості задач оптимізації конструкцій з симетрією. // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 1999. – № 7. – С.129 -133.

20. Черненко М. Г. Біфуркація розв'язків у задачах оптимізації конструкцій з симетрією // Коммунальное хозяйство городов: Науч. техн. сб., – Вып. 21. – К.: Техніка, 2000. – С.141-144.
21. Черненко М. Г. Вплив поздовжніх сил на число розв'язків задач оптимізації маси статично невизначних рам. // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 1999. – № 8 – С.242 -246.
22. Черненко М. Г. Багатовимірна біфуркація розв'язків в задачах оптимізації конструкцій із симетрією // Коммунальное хозяйство городов: Науч. техн. сб., – Вып. 22. – К.: Техніка, 2000. – С.81-85.
23. Черненко М. Г. Деякі приклади оптимізації маси статично невизначних рам // Зб. наук. праць / ХарДАЗТ, 2000. – Вип. 42. – С. 100-104.
24. Черненко М. Г. Деякі особливості задач оптимізації конструкцій з обмеженнями на деформований стан // Зб. наук. праць / ХарДАЗТ, 2001. – Вип. 45. – С.111-116.

АНОТАЦІЯ

Черненко М. Г. “Теорія і метод оптимізації сталевих стержневих конструкцій виробничих будівель і споруд”. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Харківська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2001.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої народногосподарської задачі – зниженню металомісткості будівельних конструкцій. Розроблено новий підхід до розв'язання задач глобальної оптимізації статично невизначних балок і рам, який ґрунтується на виборі оптимального розв'язку із сімейства статично невизначних систем, що залежать від параметра. Встановлено, що число локальних оптимальних розв'язків суттєво залежить від функціонального зв'язку між геометричними характеристиками перерізів стержнів. Розроблена методика аналізу чутливості функцій обмежень міцності до змінних проектування й параметрів функціонального зв'язку. Досліджено спектральні властивості матриці чутливості обмежень міцності до змінних проектування. Запропоновано чисельний метод оптимізації. Досліджено випадок біфуркації оптимального розв'язку. Розглянуто приклади мінімізації маси найпоширеніших виробничих будівель і споруд.

ЛОКАЛЬНИЙ ЕКСТРЕМУМ, ПАРАМЕТР ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ, БІФУРКАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗКУ.

ANNOTATION

Chernenko M. G. “The theory and method of optimization of steel rod constructions of industrial buildings and structures”. – Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the doctor of engineering science on a speciality 05.23.01 – building constructions, building and structure. – Kharkov State Academy of Railway Transport. Kharkov, 2001.

The thesis is devoted to a solution of the important economic task. It is devoted to a drop of the metal consumption of the building constructions. The new approach to global optimization of statically undefinable beams and frames, which based on a choice of solutions from a set optimum of statically undefinable systems, depending from a parameter, is developed. It is established, that the number of the local optimum designs essentially depends on functional relationship between the geometrical characteristics of cross sections of cores.

The technique of the analysis of sensitivity of functions of restrictions to variable designing and parameters of functional relationship is developed. The spectral properties of a matrix of sensitivity of restrictions to variable designing are investigated. The numerical method of optimization is offered. The case of a bifurcation of an optimal solution is investigated. The examples of minimization of mass of some manufacturing buildings and structures are considered.

LOCAL EXTREMUM, THE PARAMETER OF FUNCTIONAL RELATIONSHIP, BIFURCATION OF THE OPTIMUM DESIGN.

АННОТАЦИЯ

Черненко Н. Г. “Теория и метод оптимизации стальных стержневых конструкций производственных зданий и сооружений”. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2001.

Диссертация посвящена решению важнейшей народнохозяйственной задачи – снижению металлоемкости строительных конструкций. Разработан новый подход к глобальной оптимизации статически неопределимых балок и рам, основанный на выборе решений из семейства оптимальных статически неопределимых систем, зависящих от параметра. Установлено, что число локальных оптимальных решений в задачах минимизации массы или стоимости таких систем существенно зависит от принятой функциональной связи между геометрическими характеристиками поперечных сечений стержней.

Использование понятия функциональной связи позволяет значительно сократить число геометрических характеристик поперечных сечений, подлежащих определению из условий оптимизации. В случае допустимых функциональных зависимостей появляется возможность формулирования задачи оптимизации в любом из пространств переменных проектирования: моментов инерции, моментов сопротивления или площадей поперечных сечений стержней. Частные производные от функций ограничений и цели при переходе к другому пространству переменных проектирования преобразуются по ковариантному закону. При этом множители Лагранжа в условиях оптимальности Куна-Таккера являются инвариантами.

Параметры функциональной связи оказывают существенное влияние на технико-экономические показатели оптимальных решений. С этой целью разработаны методики определения параметров функциональной связи для наиболее распространенных поперечных сечений и установления границ рационального их назначения с учетом местной устойчивости возможностям прокатки и другими требованиями.

Исследованы некоторые проектирующие свойства статически неопределимых систем. Показано, что в системах с одной лишней связью, а также в системах с одной степенью кинематической неопределимости внутренние силы в статически неопределимой системе можно представить через внутренние силы в “составляющих конструкциях”, не зависящие от соотношения жесткостей, и естественные координаты, являющиеся только функциями соотношений жесткостей системы.

Предлагается методика анализа чувствительности внутренних сил и перемещений к переменным проектирования и параметрам функциональной связи, позволяющая при вычислении частных производных использовать любую

конечно-элементную программу расчета статически неопределимых стержневых систем.

Для численного решения задач оптимизации массы или стоимости используется метод продолжения решения по параметру. В качестве такого параметра выбирается функциональная связь между геометрическими характеристиками поперечных сечений стержней. В регулярном случае процесс продолжения осуществляется в классе равнопрочных систем с возможным переходом к неравнопрочным системам. Для уменьшения объема вычислений при уточнении решения используются экстраполяционные формулы Адамса-Башфорта.

Особый интерес представляет явление бифуркации, поскольку здесь скрыта информация о решениях, связанных между собой посредством ветвления. Коразмерность матрицы чувствительности ограничений прочности в точке бифуркации определяет размерность бифуркационной задачи. В системах с симметрией эта коразмерность совпадает с кратностью единичного собственного значения матрицы чувствительности внутренних сил в статически неопределимой системе и может быть значительной. В статически неопределимых системах с одной лишней связью возможен только одномерный случай бифуркации оптимального решения.

В одномерном случае бифуркация оптимального решения может возникать при переходе от равнопрочного решения к неравнопрочному, а также в системах с симметрией. В последнем случае наблюдаются различные патологические ситуации, не поддающиеся решению стандартными способами. На число локальных оптимальных решений существенное влияние оказывают также продольные силы в раме.

Многомерный случай бифуркации оптимального решения возникает в основном в системах с симметрией. Анализ числа решений в некоторых системах показывает, что в точке бифуркации существуют направления, приводящие к системам с одним исключенным стержнем. Последующий анализ бифуркаций полученных систем позволяет найти локальные решения вплоть до вырожденных систем в виде отдельных стержней, воспринимающих заданную нагрузку.

Рассмотренные некоторые тестовые задачи, а также задачи минимизации массы поперечных рам наиболее распространенных производственных зданий и отдельных сооружений показывают эффективность предложенного метода оптимизации стальных стержневых конструкций.

ЛОКАЛЬНЫЙ ЭКСТРЕМУМ, ПАРАМЕТР ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СВЯЗИ, БИФУРКАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ.

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ТЕОРІЯ І МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ
СТАЛЕВИХ СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
ВИРОБНИЧИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Черненко Микола Григорович

Відповідальний за випуск Романенко В. В.

Підписано до друку 10.09. 2001 р.
Формат паперу 60 x 84 1/16. Папір для розмножувальних апаратів.
Друк офсетний. Умовн.-друк. арк. 2.5. Обл.-вид. арк. 2.75.
Замовлення № 418. Тираж 100. Безкоштовно.

Видавництво ХарДАЗТу. Свідоцтво ДК № 112 від 06.07.2000 р.
Друкарня ХарДАЗТ, 61050, м. Харків - 50, майдан Фейєрбаха, 7