

БУДІВЕЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Будівельна механіка та гідравліка»

**РОЗРАХУНОК СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧНИХ ФЕРМ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРА**

Харків 2011

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Будівельна механіка та гідравліка» 3 червня 2010 р., протокол №11.

У методичних вказівках висвітлені питання розрахунку плоских статично невизначних ферм. Традиційний розгляд питань розрахунку зазначених систем поєднується із сучасним трактуванням, орієнтованим на застосування комп'ютера. Наведені основні теоретичні положення, варіанти розрахунково-графічних робіт, приклади розв'язання.

Призначені для студентів спеціальностей «Будівництво залізниць, колія і колійне господарство», «Промислове і цивільне будівництво».

Укладачі:

проф. Е.Д. Чихладзе,
доц. О.М. Кобзева

Рецензент

проф. В.П. Кожушко (ХНАДУ)

РОЗРАХУНОК СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧНИХ ФЕРМ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРА

Відповідальний за випуск Кобзева О.М.

Редактор Буранова Н.В.

Підписано до друку 30.06.10 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

ВСТУП

Ферми застосовуються як конструктивні елементи різноманітних споруд. Вони, головним чином, сприймають діюче на споруду навантаження. Ті ферми, які застосовуються на практиці, статично невизначні, тому що не мають ідеальних шарнірних з'єднань у вузлах. Тут ми зупинимося на загальноприйнятому розрахунку ферми як системи з ідеально шарнірними

вузлами і будемо розглядати статично невизначні плоскі ферми, перебуваючі під дією вузлового навантаження. Як приклад застосування ферми наведемо залізничний міст (див. рисунок), де статично невизначна балочна ферма доцільніша, ніж розрізні ферми, тому що має більш плавну пружну лінію і не зазнає ударів при переході осей поїзда від однієї розрізної ферми до іншої. Крім того, статично невизначна ферма є більш надійною, тому що аварія окремих її елементів (зайвих зв'язків) не призводить до таких наслідків, як зруйнування елементів статично визначних ферм.

Звернемо увагу і на недоліки статично невизначних ферм, які полягають у тому, що ці ферми дуже чутливі до нерівномірного осідання опор. Цим пояснюється той факт, що наприкінці XIX і в першій половині XX сторіччя мости з нерозрізними фермами не будувались через відсутність надійних фундаментів опор. Тепер фундаменти глибокого закладення дозволяють забезпечити необхідну надійність опор.

Нерозрізні ферми з паралельними поясами застосовуються для прогонів 80-150 м, а ферми із збільшеною висотою над проміжними опорами застосовують для прогонів 100-250 м.

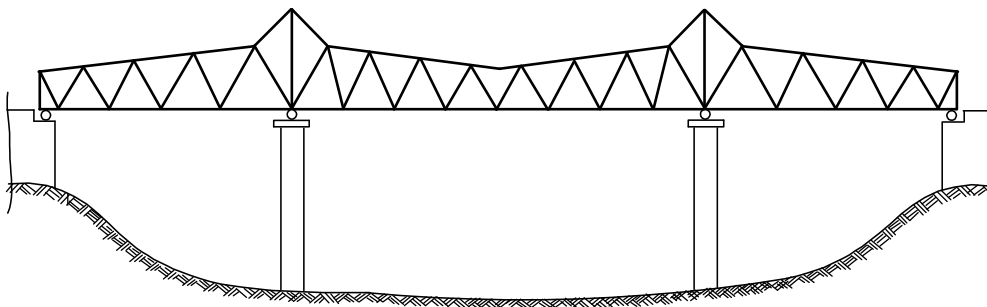


Схема моста, прогонова будова якого складена із статично невизначних плоских ферм

1 КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ

Розрізняють два типи статично невизначних ферм: зовнішньо і внутрішньо статично невизначні ферми. Прикладами зовнішньо статично невизначних ферм є нерозрізні ферми (див. рисунок у вступі і рисунок 1.1).

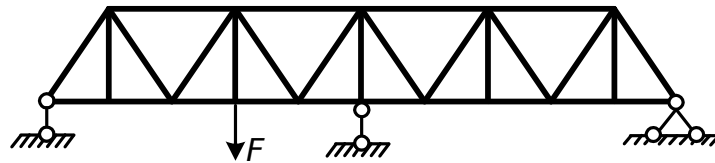


Рисунок 1.1 – Зовнішньо статично невизначна ферма

До внутрішньо статично невизначних ферм відносять різні ферми зі складними решітками та комбіновані системи (рисунок 1.2).

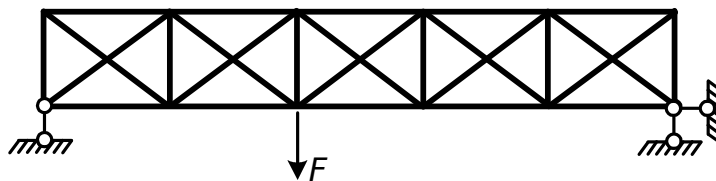


Рисунок 1.2 – Внутрішньо статично невизначна ферма

Розподіл ферм на внутрішньо та зовнішньо статично невизначні системи є умовним. Одну й ту саму систему можна розглядати як зовнішньо, так і внутрішньо статично невизначну.

Кількість зайвих зв'язків статично невизначної ферми визначається за формулою

$$L = C_0 + C - 2U, \quad (1.1)$$

де C_0 – кількість опорних стержнів;

C – кількість стержнів ферми;

U – кількість вузлів ферми.

Нагадаємо відомий факт. Для того щоб плоска ферма була статично визначною відносно опор (зовнішня статична невизначність), необхідно і достатньо трьох опорних стержнів, тобто C_0 для такої ферми дорівнює трьом.

1.1 Розрахунок ферм на нерухоме навантаження

Загальний хід розрахунку статично невизначної ферми при заданих розмірах поперечного перерізу стержнів такий самий, як і для рамних систем. Треба тільки мати на увазі, що в стержнях ферми діють лише поздовжні сили, і тоді в загальній формулі Максвелла-Мора (1.2) для плоских систем

$$\Delta_{kF} = \sum \int \frac{M_k M_F}{EJ} ds + \sum \int \frac{N_k N_F}{EA} ds + \sum \int \frac{\mu Q_k Q_F}{GA} ds \quad (1.2)$$

треба залишити члени з поздовжніми силами (другий член).

Викладемо порядок розрахунку один раз статично невизначної ферми (рисунок 1.1). Вилучимо із заданої ферми зайвий зв'язок, відкинувши проміжню опору нерозрізної ферми. Реакцію цієї опори приймаємо за зайву невідому силу X_1 (рисунок 1.3).

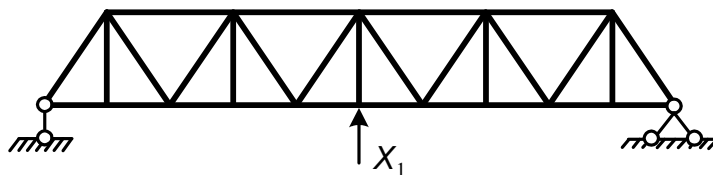


Рисунок 1.3 – Основна система для заданої ферми

Складемо для основної системи канонічне рівняння, фізична суть якого полягає в тому, що сумарне переміщення точки прикладення зайвої невідомої сили в напрямі її дії, викликане зайвою невідомою силою і зовнішнім навантаженням, дорівнює нулю:

$$X_1 \delta_{11} + \Delta_{1F} = 0. \quad (1.3)$$

Тут δ_{11} – переміщення в напрямі X_1 , викликане цією ж силою $X_1 = 1$

$$\delta_{11} = \sum_{i=1}^C \frac{N_{1i}^2 \ell_i}{EA_i}, \quad (1.4)$$

Δ_{1F} – переміщення в напрямі X_1 від дії заданого навантаження F

$$\Delta_{1F} = \sum_{i=1}^C \frac{N_{1i} N_{Fi} \ell_i}{EA_i}; \quad (1.5)$$

N_{1i} – зусилля в i -му стержні від $X_1 = 1$; N_{Fi} – зусилля в i -му стержні від зовнішнього навантаження; ℓ_i – довжина i -го стержня ферми; A_i – площа поперечного перерізу i -го стержня; C – кількість стержнів ферми; E – модуль пружності матеріалу, з якого виготовлені стержні.

З рівняння (1.3) з урахуванням (1.4) та (1.5) знаходимо

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1F}}{\delta_{11}} = -\frac{\sum_{i=1}^C \frac{N_{1i} N_{Fi} \ell_i}{EA_i}}{\sum_{i=1}^C \frac{N_{1i}^2 \ell_i}{EA_i}}. \quad (1.6)$$

У фермах, стержні яких виготовлені з одного матеріалу, модуль пружності E можна винести за знаки сум і скоротити. З рівняння (1.6) видно, що зайва невідома сила X_1 залежить від співвідношення площ перерізу стержнів, утворюючих ферму.

Якщо ферма є внутрішньо статично невизначною, то підсумовування в знаменнику формули (1.6) поширюється і на перерізаний стержень.

Визначивши зайву невідому силу X_1 , знаходимо зусилля в будь-якому i -му стержні ферми за формулою

$$N_{\text{розрах.}i} = N_{Fi} + N_{1i} X_1. \quad (1.7)$$

Подібно виконується розрахунок n разів статично невизначної ферми; зайві невідомі сили визначають з системи канонічних рівнянь, а розрахункові зусилля в i -му стержні знаходяться за формулою

$$N_{\text{розрах.}i} = N_{Fi} + N_{1i}X_1 + N_{2i}X_2 + \dots + N_{ni}X_n. \quad (1.8)$$

1.2 Розрахунок ферм на рухоме навантаження

Розглянемо, як і раніше, ферму з одним зайвим зв'язком. Оскільки зусилля в статично невизначній фермі залежить від зайвої невідомої сили (див. вираз (1.7)), то при розрахунках на рухоме навантаження передусім побудуємо лінію впливу зайвої невідомої сили. Будемо виходити з канонічного рівняння (1.3). Через те що розрахунок ведеться на одиничний вантаж $F=1$, замінимо в рівнянні (1.3) Δ_{1F} на δ_{1F} і, застосовуючи теорему про взаємність одиничних переміщень, одержимо $\delta_{1F} = \delta_{F1}$. З урахуванням цього, з рівняння (1.3) знайдемо

$$X_1 = -\frac{\delta_{F1}}{\delta_{11}}. \quad (1.9)$$

Тут δ_{F1} - вертикальне переміщення точки прикладення сили $F=1$ при даному її положенні, викликане дією нерухомої сили $X_1=1$.

З виразу (1.9) випливає, що лінію впливу зайвої невідомої сили X_1 можна побудувати як епюру вертикальних переміщень вузлів ферми δ_{F1} , розділивши всі її ординати на головне переміщення $(-\delta_{11})$, визначене за формулою (1.4).

Для побудови епюри вертикальних переміщень застосуємо метод пружних вантажів. Згідно з цим методом для кожного вузла вантажного поясу знаходиться пружний вантаж

$$w_j = \sum_{i=1}^n \frac{N_{1i} N_{\lambda i} \ell_i}{EA_i}, \quad (1.10)$$

де $N_{\lambda i}$ – зусилля в i -му стержні ферми від двох рівних і протилежно направлених пар сил, кожна з моментом, рівним одиниці, прикладених до двох сусідніх стержнів вантажного поясу ферми $j-1, j+1$ (рисунок 1.4, б); N_{1i} – зусилля в i -му стержні ферми від $X_1=1$ (рисунок 1.4, а).

Знайдені за формулою (1.10) пружні вантажі прикладаються до фіктивної балки (рисунок 1.4, в). При виборі фіктивної балки треба мати на увазі залежності

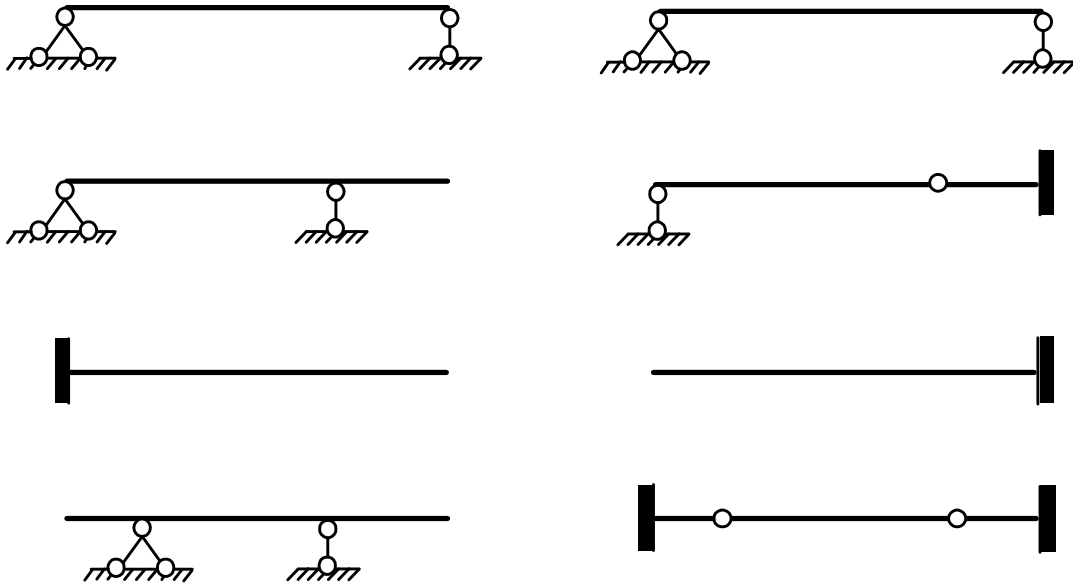
$$y = \frac{M^\phi}{EJ}, \quad \phi = \frac{Q^\phi}{EJ},$$

які показують, що прогини та кути повороту даної споруди повинні відповідати згинальним моментам і поперечним силам фіктивної балки. Наприклад, в таблиці 1.1 показані фіктивні балки для декількох заданих балок.

Побудована епюра згинальних моментів для фіктивної балки від навантаження пружними вантажами буде епюрою вертикальних переміщень δ_{F1} . Зазначимо, що при побудові епюр прогинів у фіктивній балці треба пам'ятати про те, що переміщення надпорних вузлів ферми мають дорівнювати нулю. Для виконання цієї умови у відповідних перерізах фіктивної балки треба прикласти згинальні моменти, рівні за величиною і протилежні за знаком деформаціям опорних стояків (див. додаток Б).

Таблиця 1.1

| Задана балка | Фіктивна балка |
|--------------|----------------|
|--------------|----------------|



Лінію впливу в будь-якому стержні статично невизначної ферми знаходимо за допомогою лінії впливу зайвої невідомої сили X_1 , користуючись формулою (1.7)

$$N_i = N_i^{(F=1)} + N_i^{(X_1=1)} X_1, \quad (1.11)$$

де $N_i^{(F=1)}$ – зусилля в i -му стержні ферми від навантаження $F = 1$ в статично визначній фермі (лінія впливу зусилля в i -му стержні); $N_i^{(X_1=1)}$ – зусилля в i -му стержні основної системи ферми від сили $X_1 = 1$ (стала величина).

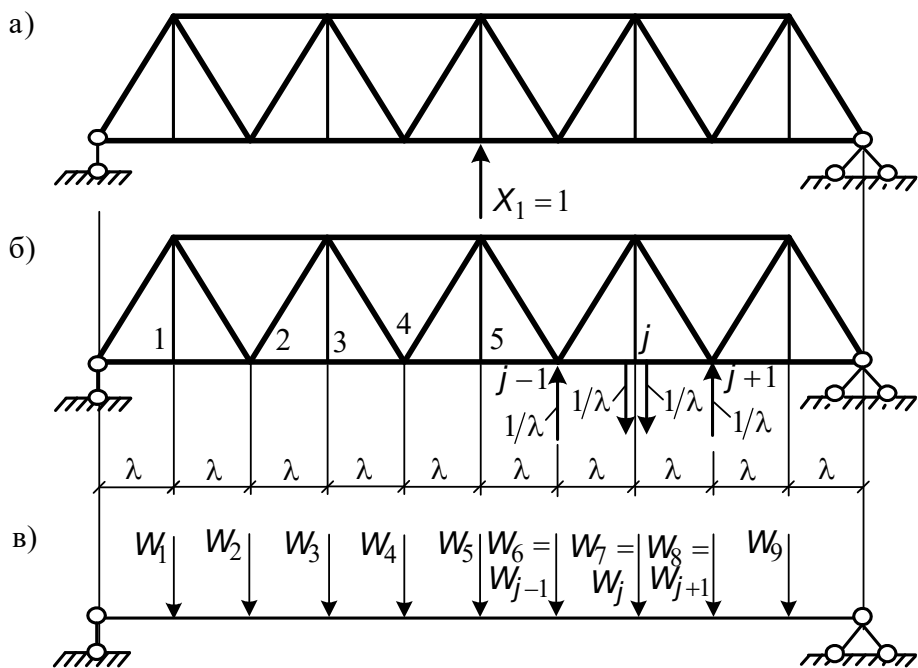


Рисунок 1.4 – До визначення пружних вантажів у вузлах ферми

2 ЗАВДАННЯ: РОЗРАХУНОК СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧНОЇ ФЕРМИ

Для заданої ферми (рисунок 2.1, таблиця 2.1) потрібно:

- 1 Визначити довжину стержнів ферми.
- 2 Вибрати основну систему, скласти канонічні рівняння.
- 3 Знайти зусилля в кожному стержні основної системи від сили $X_1 = 1$.
- 4 Знайти зусилля в кожному стержні основної системи від заданого навантаження.
- 5 З канонічного рівняння знайти величину зайвої невідомої сили X_1 .
- 6 Знайти зусилля в кожному стержні статично невизначної ферми.
- 7 Побудувати лінію впливу зайвої невідомої сили X_1 і лінію впливу зусилля в одному з стержнів заданої ферми.
- 8 За допомогою програми на комп'ютері побудувати лінії впливу для всіх стержнів заданої ферми.

9 Знайти зусилля за допомогою ліній впливу в кожному стержні ферми і порівняти з результатами аналітичного розрахунку (див. п.6).

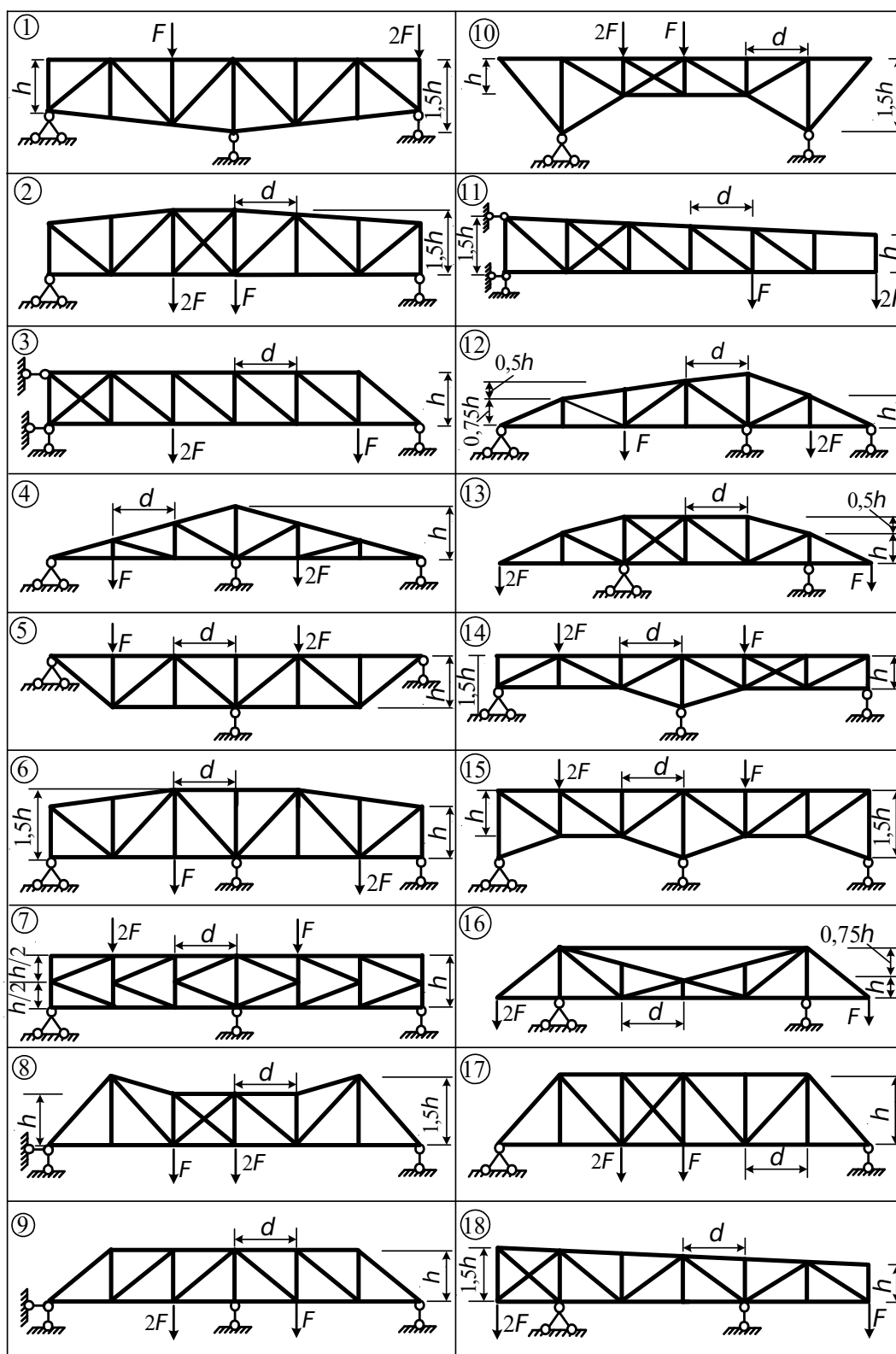


Рисунок 2.1 – Розрахункові схеми статично невизначених плоских ферм

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

| Номер варіанта | d , м | h , м | F , кН |
|-------------------|---------|---------|----------|
| 1 | 6 | 6 | 120 |
| 2 | 8 | 6 | 300 |
| 3 | 5 | 4 | 400 |
| 4 | 5 | 5 | 800 |
| 5 | 4 | 5 | 150 |
| 6 | 5 | 4 | 400 |
| 7 | 8 | 8 | 200 |
| 8 | 6 | 6 | 500 |
| 9 | 5 | 4 | 500 |
| 10 | 6 | 8 | 600 |
| 11 | 8 | 8 | 200 |
| 12 | 5 | 6 | 150 |
| 13 | 6 | 5 | 180 |
| 14 | 4 | 6 | 160 |
| 15 | 5 | 6 | 170 |
| 16 | 4 | 5 | 190 |
| 17 | 6 | 6 | 140 |
| 18 | 5 | 4 | 220 |

Примітка – Жорсткості EA усіх стержнів однакові.

2.1 Приклад розрахунку

Розрахункова схема заданої ферми показана на рисунку 2.2. Ферма має один зайвий зв'язок. Основна система ферми показана на рисунку 2.3. Канонічні рівняння мають вигляд рівняння (1.3). Довжини стержнів наведені в таблиці 2.2. Знайдемо зусилля в кожному стержні ферми в основній системі від сили $X_1=1$ (див. рисунок 2.4).

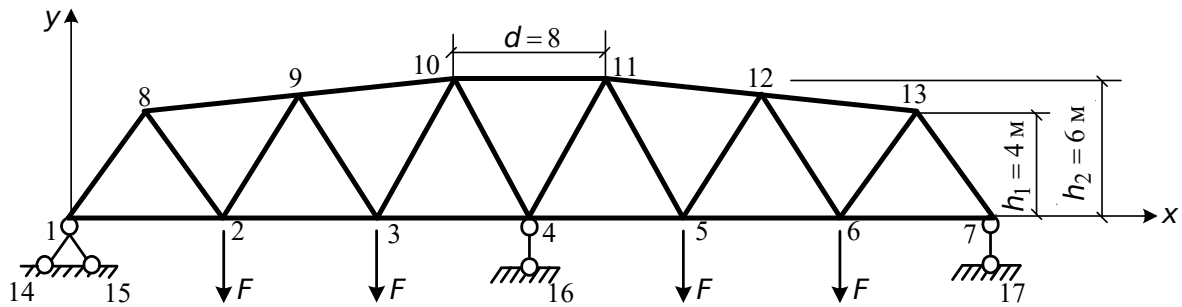


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема ферми

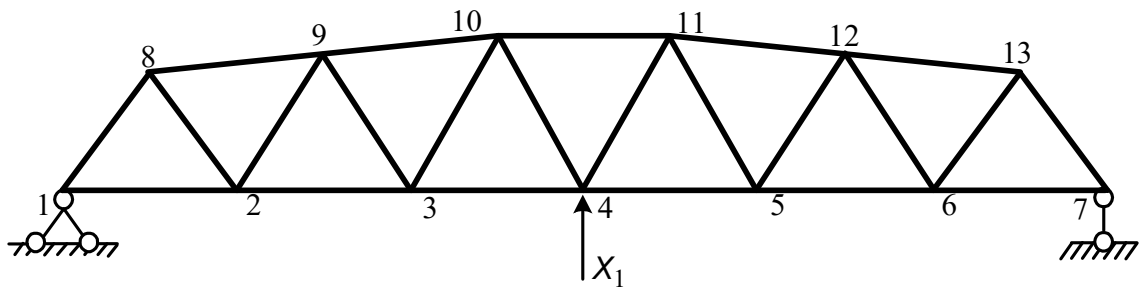


Рисунок 2.3 – Основна система

2.1.1 Розрахунок ферми на нерухоме навантаження

Зусилля в стержні 1-8. Виріжемо вузол 1 (рисунок 2.5).

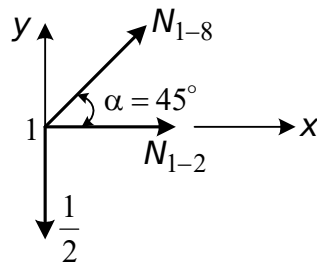


Рисунок 2.5 – Схема зусиль, діючих на вузол 1

Спроекуємо всі сили, які діють на вузол 1, на вертикальну вісь Y

$$\sum Y = 0; \quad \frac{1}{2} - N_{1-8} \sin 45^\circ = 0.$$

Звідси

$$N_{1-8} = \frac{1}{2 \cdot 0,707} = 0,707.$$

Зусилля в стержні 1-2:

$$\sum M_8^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 4 + N_{1-2} \cdot 4 = 0; \quad N_{1-2} = -0,5.$$

Зусилля в стержні 8-2:

$$\sum M_0^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 28 + N_{8-2} \cdot 25,456 = 0; \quad N_{8-2} = -0,550.$$

Зусилля в стержні 8-9:

$$\sum M_2^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 8 - N_{8-9} \cdot 4,465 = 0; \quad N_{8-9} = 0,896.$$

Зусилля в стержні 9-2:

$$\sum M_0^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 28 - N_{9-2} \cdot 28,111 = 0; \quad N_{9-2} = 0,498.$$

Зусилля в стержні 2-3:

$$\sum M_9^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 12 + N_{2-3} \cdot 5 = 0; \quad N_{2-3} = -1,2.$$

Зусилля в стержні 9-3:

$$\sum M_0^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 28 + N_{9-3} \cdot 34,358 = 0; \quad N_{9-3} = -0,407.$$

Зусилля в стержні 9-10:

$$\sum M_3^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 16 - N_{9-10} \cdot 5,457 = 0; \quad N_{9-10} = 1,466.$$

Зусилля в стержні 3-10:

$$\sum M_0^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 28 - N_{3-10} \cdot 36,610 = 0; \quad N_{3-10} = 0,382.$$

Зусилля в стержні 3-4:

$$\sum M_{10}^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 48 + N_{3-4} \cdot 6 = 0; \quad N_{3-4} = -1,667.$$

Зусилля в стержні 10-11:

$$\sum M_4^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 24 - N_{10-11} \cdot 6 = 0; \quad N_{10-11} = 2,00.$$

Зусилля в стержні 10-4:

$$\sum F_y^{\text{лів}} = 0; \quad \frac{1}{2} + N_{10-4} \cdot \cos \beta = 0; \quad N_{10-4} = -\frac{1}{2 \cdot 0,832} = -0,601.$$

Зусилля в решті стержнів ферми нема потреби визначати тому, що навантаження і ферма симетричні. Знайдені зусилля наведені в таблиці 2.2.

Знайдемо тепер зусилля в стержнях ферми від заданого навантаження (рисунок 2.6).

Зусилля в стержні 1-8. Виріжемо вузол 1 (рисунок 2.7) і складемо рівняння рівноваги, спроектувавши всі сили на вертикальну вісь Y .

$$\sum F_y = 0; \quad 220 + N_{1-8} \cdot \sin 45^\circ = 0; \quad N_{1-8} = -311,174 \text{ кН.}$$

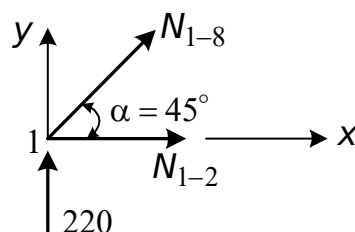


Рисунок 2.7 – Схема зусиль, діючих на вузол 1

Зусилля в стержні 1-2: переріз I-I; $\sum M_8^{\text{лів}} = 0;$

$$220 \cdot 4 - N_{1-2} \cdot 4 = 0; \quad N_{1-2} = 220 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 8-2: переріз I-I; $\sum M_0^{\text{лів}} = 0;$

$$220 \cdot 28 - N_{8-2} \cdot 25,456 = 0; \quad N_{8-2} = 241,986 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 8-9: переріз I-I; $\sum M_2^{\text{лів}} = 0;$

$$220 \cdot 8 + N_{8-9} \cdot 4,465 = 0; \quad N_{8-9} = -394,177 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 9-2: переріз II - II; $\sum M_0^{\text{лів}} = 0;$

$$220 \cdot 28 - 100 \cdot 36 + N_{9-2} \cdot 28,111 = 0; \quad N_{9-2} = -91,067 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 2-3: переріз II - II; $\sum M_9^{\text{лів}} = 0;$

$$220 \cdot 12 - 100 \cdot 4 - N_{2-3} \cdot 5 = 0; \quad N_{2-3} = 448 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 9-10: переріз III - III; IV-IV; $\sum M_3^{\text{лів}} = 0;$

$$220 \cdot 16 - 100 \cdot 8 + N_{9-10} \cdot 5,457 = 0; \quad N_{9-10} = -498,442 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 9-3: переріз III - III; $\sum M_0^{\text{лів}} = 0;$

$$220 \cdot 28 - 100 \cdot 36 - N_{9-3} \cdot 34,358 = 0; \quad N_{9-3} = 74,509 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 3-10: переріз IV-IV; $\sum M_0^{\text{лів}} = 0;$

$$220 \cdot 28 - 100 \cdot 36 - 150 \cdot 44 + N_{3-10} \cdot 36,610 = 0; \quad N_{3-10} = 110,352 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 3-4: переріз IV-IV; $\sum M_{10}^{\text{лів}} = 0;$

$$220 \cdot 20 - 100 \cdot 12 - 150 \cdot 4 - N_{3-4} \cdot 6 = 0; \quad N_{3-4} = 433,333 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 10-4: переріз IV-IV; $\sum F_y^{лів} = 0;$

$$220 - 100 - 150 - N_{10-4} \cdot \cos 33,69^\circ = 0; \quad N_{10-4} = -36,058 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 10-11: переріз V-V; $\sum M_y^{лів} = 0;$

$$220 \cdot 24 - 100 \cdot 16 - 150 \cdot 8 + N_{10-11} \cdot 6 = 0; \quad N_{10-11} = -413,333 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 11-4: переріз VI-VI; $\sum F_y^{прав} = 0;$

$$220 - 50 - 120 - N_{11-4} \cdot \cos 33,69^\circ = 0; \quad N_{11-4} = 36,058 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 4-5: переріз VI-VI; $\sum M_{11}^{прав} = 0;$

$$220 \cdot 20 - 120 \cdot 12 - 50 \cdot 4 - N_{4-5} \cdot 6 = 0; \quad N_{4-5} = 393,333 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 11-5: переріз VII-VII; $\sum M_0^{прав} = 0;$

$$220 \cdot 28 - 120 \cdot 36 - 50 \cdot 44 + N_{11-5} \cdot 36,610 = 0; \quad N_{11-5} = 25,130 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 11-12: переріз VII-VII; $\sum M_5^{прав} = 0;$

$$220 \cdot 16 - 120 \cdot 8 + N_{11-12} \cdot 5,457 = 0; \quad N_{11-12} = -410,482 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 12-5: переріз VIII-VIII; $\sum M_0^{прав} = 0;$

$$220 \cdot 28 - 120 \cdot 36 - N_{12-5} \cdot 34,358 = 0; \quad N_{12-5} = 37,255 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 5-6: переріз VIII-VIII; $\sum M_{12}^{прав} = 0;$

$$220 \cdot 12 - 120 \cdot 4 - N_{5-6} \cdot 5 = 0; \quad N_{5-6} = 384 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 12-6: переріз IX-IX; $\sum M_0^{прав} = 0;$

$$220 \cdot 28 - 120 \cdot 36 + N_{12-6} \cdot 28,111 = 0; \quad N_{12-6} = -45,534 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 12-13: переріз IX-IX ; $\sum M_6^{\text{прав}} = 0$;

$$220 \cdot 8 + N_{12-13} \cdot 4,465 = 0; \quad N_{12-13} = -358,343 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 6-13: переріз X-X ; $\sum M_0^{\text{прав}} = 0$;

$$220 \cdot 28 - N_{6-13} \cdot 25,456 = 0; \quad N_{6-13} = 219,987 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 6-7: переріз X-X ; $\sum M_{13}^{\text{прав}} = 0$;

$$220 \cdot 4 - N_{6-7} \cdot 4 = 0; \quad N_{6-7} = 200 \text{ кН.}$$

Зусилля в стержні 13-7. Виріжемо вузол 7 (рисунок 2.8) і складемо рівняння його рівноваги

$$\sum F_y = 0; \quad 200 + N_{13-7} \cdot \sin 45^\circ = 0; \quad N_{13-7} = -282,885 \text{ кН.}$$

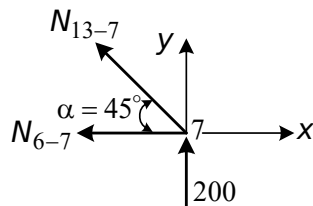


Рисунок 2.8 – Схема зусиль, діючих на вузол 7

Знайдені зусилля занесемо в таблицю 2.2. За формулою (1.6) знаходимо X_1

$$X_1 = \frac{24719,973}{94,412} = 261,831 \text{ кН.}$$

За формулою (1.7) визначимо розрахункові зусилля в заданій фермі (таблиця 2.2). Епюра розрахункових зусиль показана на рисунку 2.9.

2.1.2 Розрахунок ферми на рухоме навантаження

Спочатку побудуємо лінію впливу X_1 (додаток В). В основній системі ферми знайдемо зусилля в її стержнях від пар сил з моментом, рівним одиниці, прикладених по черзі до стержнів вантажного поясу, прилеглих до вузлів 2, 3, 4 (рисунок 2.10, а, б, в).

Пара сил прикладена до стержнів, прилеглих до вузла 2.

Зусилля в стержні 1-8. Виріжемо вузол 1 (рисунок 2.11) і складемо рівняння його рівноваги

$$\sum F_y = 0; \quad \frac{1}{8} + \bar{N}_{1-8} \cdot \sin 45^\circ = 0; \quad \bar{N}_{1-8} = -0,177.$$

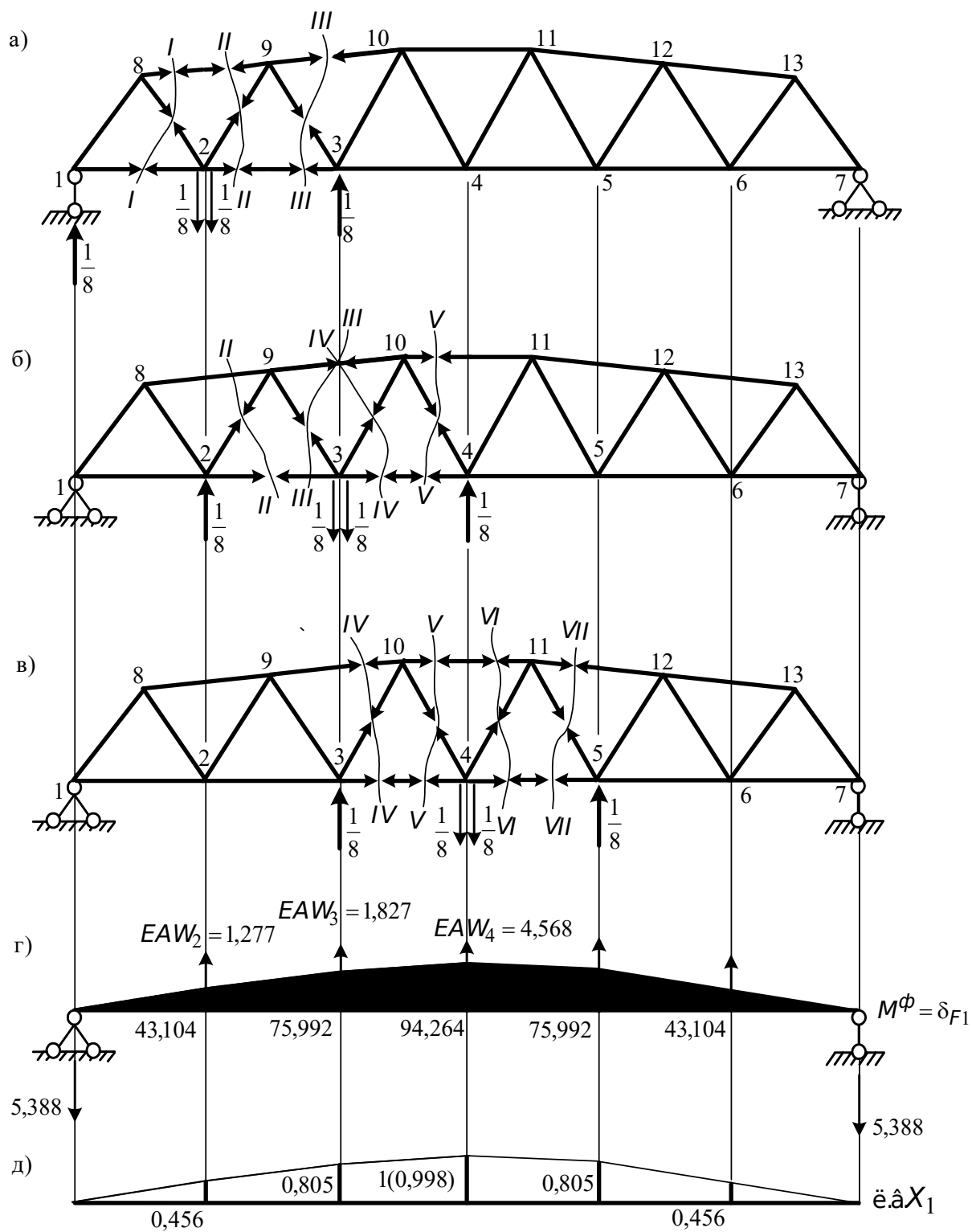


Рисунок 2.10 – Визначення пружних вантажів і побудова лінії впливу X_1

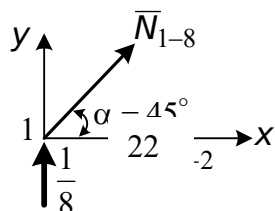


Рисунок 2.11 – Схема зусиль, діючих на вузол 1

Зусилля в стержні 1-2: $\sum M_8^{\text{лів}} = 0;$

$$\frac{1}{8} \cdot 4 - \bar{N}_{1-2} \cdot 4 = 0; \quad \bar{N}_{1-2} = 0,125.$$

Зусилля в стержні 8-2: $\sum M_0^{\text{лів}} = 0$ (див. рисунки 2.6 і 2.10,а);

$$\frac{1}{8} \cdot 28 - \bar{N}_{8-2} \cdot 25,456 = 0; \quad \bar{N}_{8-2} = 0,137.$$

Зусилля в стержні 8-9:

$\sum M_2^{\text{лів}} = 0$ (див. рисунки 2.6 і 2.10,а);

$$\frac{1}{8} \cdot 8 + \bar{N}_{8-9} \cdot 4,465 = 0; \quad \bar{N}_{8-9} = -0,224.$$

Зусилля в стержні 9-2:

$\sum M_0^{\text{лів}} = 0$ (див. рисунки 2.6 і 2.10,а);

$$\frac{1}{8} \cdot 28 - \frac{1}{4} \cdot 36 + \bar{N}_{9-2} \cdot 28,111 = 0; \quad \bar{N}_{9-2} = 0,196.$$

Зусилля в стержні 2-3:

$\sum M_9^{\text{лів}} = 0$ (див. рисунки 2.6 і 2.10,а);

$$\frac{1}{8} \cdot 12 - \frac{1}{4} \cdot 4 - \bar{N}_{2-3} \cdot 5 = 0; \quad \bar{N}_{2-3} = 0,1.$$

Зусилля в стержні 9-3:

$$\sum M_0^{\text{лів}} = 0 \text{ (див. рисунки 2.6 і 2.10, а);}$$

$$\frac{1}{8} \cdot 28 - \frac{1}{4} \cdot 36 - \bar{N}_{9-3} \cdot 34,358 = 0; \quad \bar{N}_{9-3} = -0,160.$$

Зусилля в решті стержнів ферми дорівнюють нулю. Знайдені зусилля занесемо в таблицю 2.3.

Пара сил прикладена до стержнів, прилеглих до вузла 3.

$$\text{Зусилля в стержні 9-2: } \sum M_0^{\text{лів}} = 0 \text{ (див. рисунки 2.6 і 2.10, б);}$$

$$\frac{1}{8} \cdot 36 + \bar{N}_{9-2} \cdot 28,111 = 0; \quad \bar{N}_{9-2} = -0,160.$$

$$\text{Зусилля в стержні 2-3: } \sum M_9^{\text{лів}} = 0 \text{ (див. рисунки 2.6 і 2.10, б);}$$

$$\frac{1}{8} \cdot 4 - \bar{N}_{2-3} \cdot 5 = 0; \quad \bar{N}_{2-3} = 0,1.$$

$$\text{Зусилля в стержні 9-3: } \sum M_0^{\text{лів}} = 0 \text{ (див. рисунки 2.6 і 2.10, б);}$$

$$\frac{1}{8} \cdot 36 - \bar{N}_{9-3} \cdot 34,358 = 0; \quad \bar{N}_{9-3} = 0,131.$$

$$\text{Зусилля в стержні 9-10: } \sum M_3^{\text{лів}} = 0 \text{ (див. рисунки 2.6 і 2.10, б);}$$

$$\frac{1}{8} \cdot 8 + \bar{N}_{9-10} \cdot 5,457 = 0; \quad \bar{N}_{9-10} = -0,183.$$

$$\text{Зусилля в стержні 10-3: } \sum M_0^{\text{лів}} = 0 \text{ (див. рисунки 2.6 і 2.10, б);}$$

$$\frac{1}{8} \cdot 36 - \frac{1}{4} \cdot 44 + \bar{N}_{10-3} \cdot 36,610 = 0; \quad \bar{N}_{10-3} = 0,177.$$

$$\text{Зусилля в стержні 3-4: } \sum M_{10}^{\text{лів}} = 0 \text{ (див. рисунки 2.6 і 2.10, б);}$$

$$\frac{1}{8} \cdot 12 - \frac{1}{4} \cdot 4 - \bar{N}_{3-4} \cdot 6 = 0; \quad \bar{N}_{3-4} = 0,083.$$

Зусилля в стержні 10-4: $\sum F_{y^{np}} = 0$ (див. рисунки 2.6 і 2.10, б);

$$\frac{1}{8} + \bar{N}_{10-4} \cdot \cos 33,69^\circ = 0; \quad \bar{N}_{10-4} = -0,150.$$

Зусилля в решті стержнів ферми дорівнюють нулю.

Знайдені зусилля заносимо в таблицю 2.3.

Пара сил прикладена до стержнів, прилеглих до вузла 4.

Зусилля в стержні 3-10: $\sum M_0^{лнв} = 0$ (див. рисунки 2.6 і 2.10, в);

$$\frac{1}{8} \cdot 44 + \bar{N}_{3-10} \cdot 36,610 = 0; \quad \bar{N}_{3-10} = -0,150.$$

Зусилля в стержні 3-4: $\sum M_0^{лнв} = 0$ (див. рисунки 2.6 і 2.10, в);

$$\frac{1}{8} \cdot 4 - \bar{N}_{3-4} \cdot 6 = 0; \quad \bar{N}_{3-4} = 0,083.$$

Зусилля в стержні 10-4: $\sum F_{y^{лнв}} = 0$ (див. рисунки 2.6 і 2.10, в);

$$\frac{1}{8} - \bar{N}_{10-4} \cdot \cos 33,69^\circ = 0; \quad \bar{N}_{10-4} = 0,150.$$

Зусилля в стержні 10-11: $\sum M_4^{лнв} = 0$ (див. рисунки 2.6 і 2.10, в);

$$\frac{1}{8} \cdot 8 + \bar{N}_{10-11} \cdot 6 = 0; \quad \bar{N}_{10-11} = -0,167.$$

Зусилля в стержні 11-4: $\sum F_{y^{np}} = 0$ (див. рисунок 2.10, в);

$$\frac{1}{8} - \bar{N}_{11-4} \cdot \cos 33,69^\circ = 0; \quad \bar{N}_{11-4} = 0,150.$$

Зусилля в стержні 4-5: $\sum M_{11}^{\text{сп}} = 0$ (див. рисунок 2.10, в);

$$\frac{1}{8} \cdot 4 - \bar{N}_{4-5} \cdot 6 = 0; \quad \bar{N}_{4-5} = 0,083.$$

Зусилля в стержні 11-5: $\sum F_y^{\text{сп}} = 0$ (див. рисунок 2.10, в);

$$\frac{1}{8} + \bar{N}_{11-5} \cdot \cos 33,69^\circ = 0; \quad \bar{N}_{11-5} = -0,150.$$

У зв'язку з симетрією основної системи і навантаження зусилля $\bar{N}_{3-10} = \bar{N}_{11-5}$; $\bar{N}_{10-4} = \bar{N}_{11-4}$; $\bar{N}_{3-4} = \bar{N}_{4-5}$. Як і раніше, знайдені зусилля заносимо в таблицю 2.3 і обчислюємо пружний вантаж. Далі одержаними в таблицю 2.3 пружними вантажами завантажуються фіктивна балка (рисунок 2.10, г) і будується епюра моментів. Ординати ліній впливу X_1 обчислюються відповідно до формули (1.9). Знайдена під силою X_1 ордината лінії впливу дорівнює 0,998. Похибка розрахунку становить 0,2%. По лінії впливу X_1 знайдемо величину X_1 від нерухомого навантаження:

$$X_1 = 100 \cdot 0,456 + 150 \cdot 0,805 + 50 \cdot 0,805 + 120 \cdot 0,456 = 261,32 \text{ кН.}$$

При розрахунку ферми на нерухоме навантаження (див. підрозд. 2.1.1) величина X_1 дорівнювала 261,831 кН. Похибка розрахунку становить 0,19%.

Побудуємо тепер лінії впливу зусиль у стержнях заданої статично невизначної ферми. Відповідно до формули (1.11) шукана лінія впливу є сумою двох ліній впливу: лінії впливу в основній системі ферми та лінії впливу X_1 (рисунок 2.10, д), всі

ординати якої помножені на постійне число – зусилля в основній системі від $X_1 = 1$.

Лінія впливу N_{1-8} . Для побудови лінії впливу N_{1-8}^0 (символ N_{1-8}^0 означає, що лінія впливу будується в основній системі) застосуємо спосіб вирізування вузла. Виріжемо вузол 1 (рисунок 2.13).

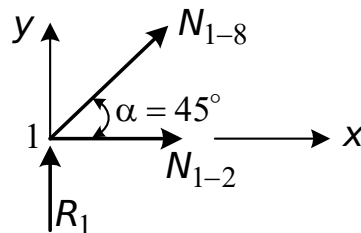


Рисунок 2.13 – Схема зусиль, діючих на вузол 1

Розглянемо два положення вантажу $F = 1$: вантаж у вузлі 1, $R_1 = 1$, $N_{1-8} = 0$; вантаж поза вузлом, $\sum F_y = 0$, $R_1 + N_{1-8}^0 \cdot \sin 45^\circ = 0$,

$N_{1-8}^0 = -R_1 \frac{1}{0,707}$. Отже, лінія впливу N_{1-8}^0 правіше від перерізу буде такою ж, як і лінія впливу R_1 , усі ординати якої помножені на постійне число $\left(-\frac{1}{0,707}\right)$ (див. рисунок 2.12, б). Далі лінію впливу X_1 помножимо на 0,707 (див. таблицю 2.2, рисунок 2.12, в). Лінія впливу N_{1-8} у заданій фермі дорівнює сумі побудованих ліній впливу (рисунок 2.12, г).

Обчислимо по лінії впливу зусилля N_{1-8} і порівняємо з результатом аналітичного розрахунку (таблиця 2.2).

$$N_{1-8} = -100 \cdot 0,856 - 150 \cdot 0,374 + 50 \cdot 0,097 + 120 \cdot 0,086 = -126,53 \text{ кН.}$$

Похибка становить 0,37 %.

Лінія впливу N_{1-2} . Для визначення зусилля від одиничного навантаження в стержні 1-2 застосуємо спосіб перерізів (переріз I-I, рисунок 2.6): вантаж розташований справа від розсіченої панелі, $\sum M_8^{\text{лів}} = 0$, $R_1 \cdot 4 - N_{1-2}^0 \cdot 4 = 0$, $N_{1-2}^0 = R_1$; вантаж в точці 1, $R_1 = 1$ і $N_{1-2}^0 = 0$. Лінія впливу N_{1-2}^0 зображена на рисунку 2.12, д. Після цього лінію впливу X_1 множимо на (-0,5) (див. таблицю 2.2 і рисунок 2.12, е) і обидві лінії впливу складаємо (рисунок 2.12,

ж). Як і в попередньому випадку, визначаємо зусилля за побудованою лінією впливу N_{1-2} :

$$N_{1-2} = 100 \cdot 0,605 + 150 \cdot 0,264 - 50 \cdot 0,0695 - 120 \cdot 0,061 = 89,305 \text{ кН.}$$

Похибка становить 0,25 %.

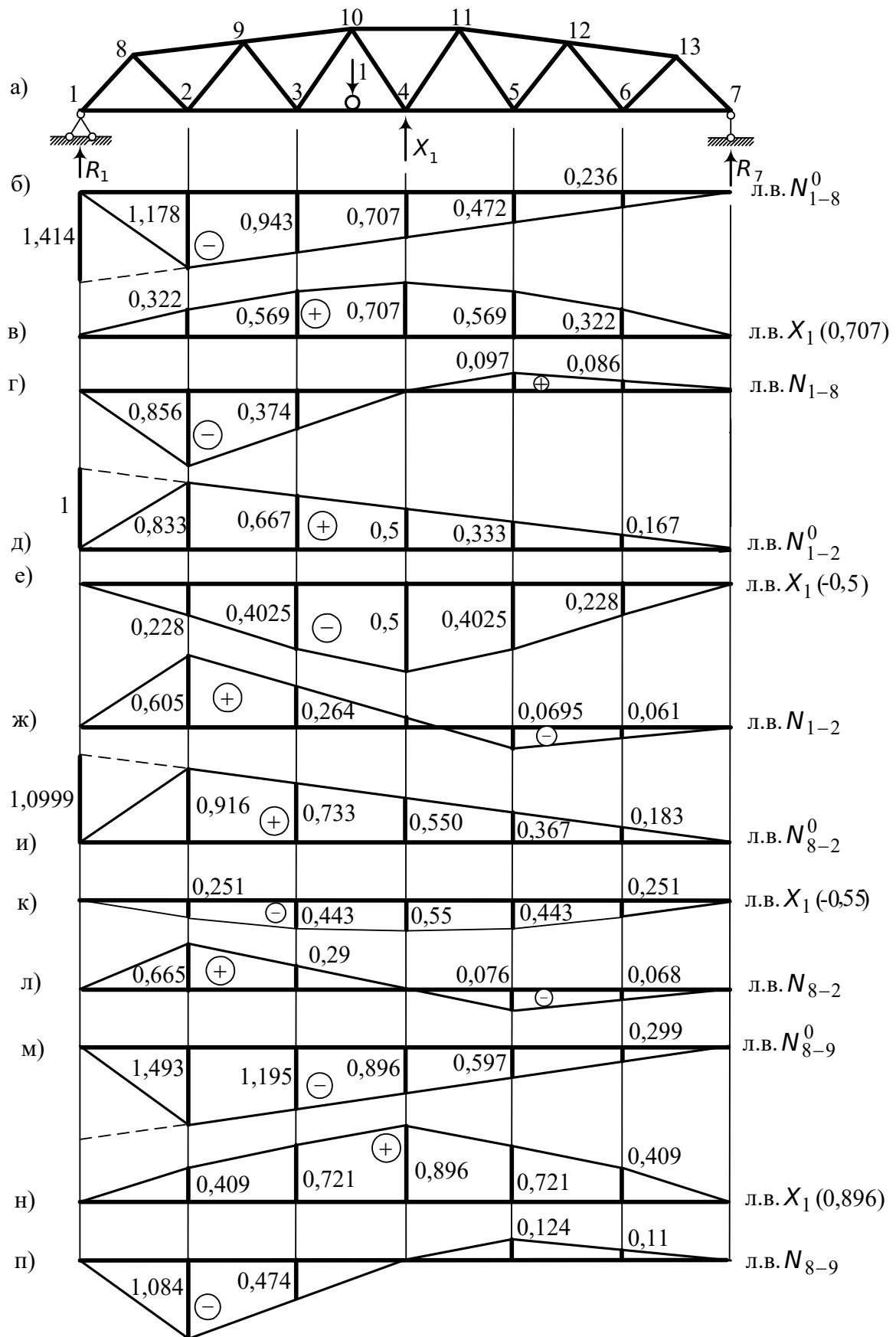


Рисунок 2.12 – Побудова ліній впливу зусиль у заданій фермі

Лінія впливу N_{8-2} . При визначенні зусиль від одиничного навантаження в стержні 8-2 проведемо переріз I-I (див. рисунок 2.6): вантаж у точці 1, $R_1=1$, N_{8-2}^0 дорівнює нулю (це видно з рівняння $\sum M_0^{лів} = 0$); вантаж на ділянці 2-7: $\sum M_0^{пр} = 0$,

$$R_1 \cdot 28 - N_{8-2}^0 \cdot 25,456 = 0, \quad N_{8-2}^0 = 1,0999R_1.$$

Лінія впливу N_{8-2}^0 зображена на рисунку 2.12, и. Далі ординати лінії впливу X_1 множимо на (-0,55) (див. таблицю 2.2). Складаючи ординати лінії впливу N_{8-2}^0 і лінії впливу X_1 (-0,55) (рисунок 2.12, к), знаходимо лінію впливу N_{8-2} в заданій фермі (рисунок 2.12, л). Визначаємо зусилля від заданого нерухомого навантаження

$$N_{8-2} = 100 \cdot 0,605 + 150 \cdot 0,29 - 50 \cdot 0,076 - 120 \cdot 0,068 = 98,04 \text{ кН.}$$

Похибка в порівнянні з аналітичним розрахунком (див. таблицю 2.2) становить:

$$\frac{97,979 - 98,04}{97,979} \cdot 100 = 0,062 \%$$

Лінія впливу N_{8-9} . Зусилля від одиничного вантажу знайдемо, провівши переріз I-I (див. рисунок 2.6): вантаж у точці 1, $R_1=1$, $N_{8-9}=0$; вантаж справа від розсіченої панелі, $\sum M_2^{лів} = 0$, $R_1 \cdot 8 + N_{8-9}^0 \cdot 4,465 = 0$, $N_{8-9}^0 = -1,792$. Лінія впливу N_{8-9}^0 зображена на рисунку 2.12, м. Лінія впливу X_1 , всі ординати якої помножені на 0,896 (див. таблицю 2.2), зображена на рисунку 2.12, н. Лінія впливу N_{8-9} у заданій формі зображена на рисунку 2.12, п. Зусилля N_{8-9} від заданого нерухомого навантаження дорівнює:

$$N_{8-9} = -100 \cdot 1,084 - 150 \cdot 0,474 + 50 \cdot 0,124 + 120 \cdot 0,11 = -160,1 \text{ кН.}$$

$$\text{Похибка становить } \frac{159,576 - 160,1}{159,576} \cdot 100 = 0,33 \%$$

Лінія впливу N_{9-2} . Зусилля від одиничної сили $F=1$ у стержні 9-2 знайдемо, провівши переріз II-II (див. рисунок 2.6): вантаж зліва від розсіченої панелі, $\sum M_0^{\text{сп}} = 0$, $R_7 \cdot 76 - N_{9-2}^0 \cdot 28,111 = 0$,
 $N_{9-2}^0 = 2,704R_7$, вантаж справа від розсіченої панелі, $\sum M_0^{\text{лів}} = 0$,
 $R_1 \cdot 28 + N_{9-2}^0 \cdot 28,111 = 0$, $N_{9-2}^0 = -0,996R_1$. Лінія впливу N_{9-2}^0 зображена на рисунку 2.14, б. Відповідно до таблиці 2.2 ординати лінії впливу X_1 множимо на 0,498 (див. рисунок 2.14, в). Лінія впливу N_{9-2} показана на рисунку 2.14, г. Знайдемо зусилля N_{9-2} за побудованою лінією впливу:

$$N_{9-2} = 100 \cdot 0,678 - 150 \cdot 0,263 + 50 \cdot 0,069 + 120 \cdot 0,061 = 39,12 \text{ кН.}$$

Похибка становить $\frac{39,325 - 39,12}{39,325} \cdot 100 = 0,52\%$.

Лінія впливу N_{2-3} . Переріз II-II (рисунок 2.6). Вантаж $F=1$ зліва від перерізу, $\sum M_9^{\text{сп}} = 0$, $R_1 \cdot 36 - N_{2-3}^0 \cdot 5 = 0$, $N_{2-3}^0 = 7,2 \cdot R_1$.

Вантаж $F=1$ справа від перерізу, $\sum M_9^{\text{лів}} = 0$, $R_1 \cdot 12 - N_{2-3}^0 \cdot 5 = 0$,
 $N_{2-3}^0 = 2,4 \cdot R_1$. Лінія впливу N_{2-3}^0 зображена на рисунку 2.14, д. Лінія впливу X_1 , ординати якої помножені на $(-1,2)$ (див. таблицю 2.2), зображена на рисунку 2.14, е. Сумарна лінія впливу зображена на рисунку 2.14, ж. Зусилля N_{2-3} дорівнює

$$N_{2-3} = 100 \cdot 0,653 + 150 \cdot 0,634 - 50 \cdot 0,166 - 120 \cdot 0,147 = 134,46 \text{ кН.}$$

Похибка становить $\frac{133,803 - 134,46}{133,803} \cdot 100 = 0,49\%$.

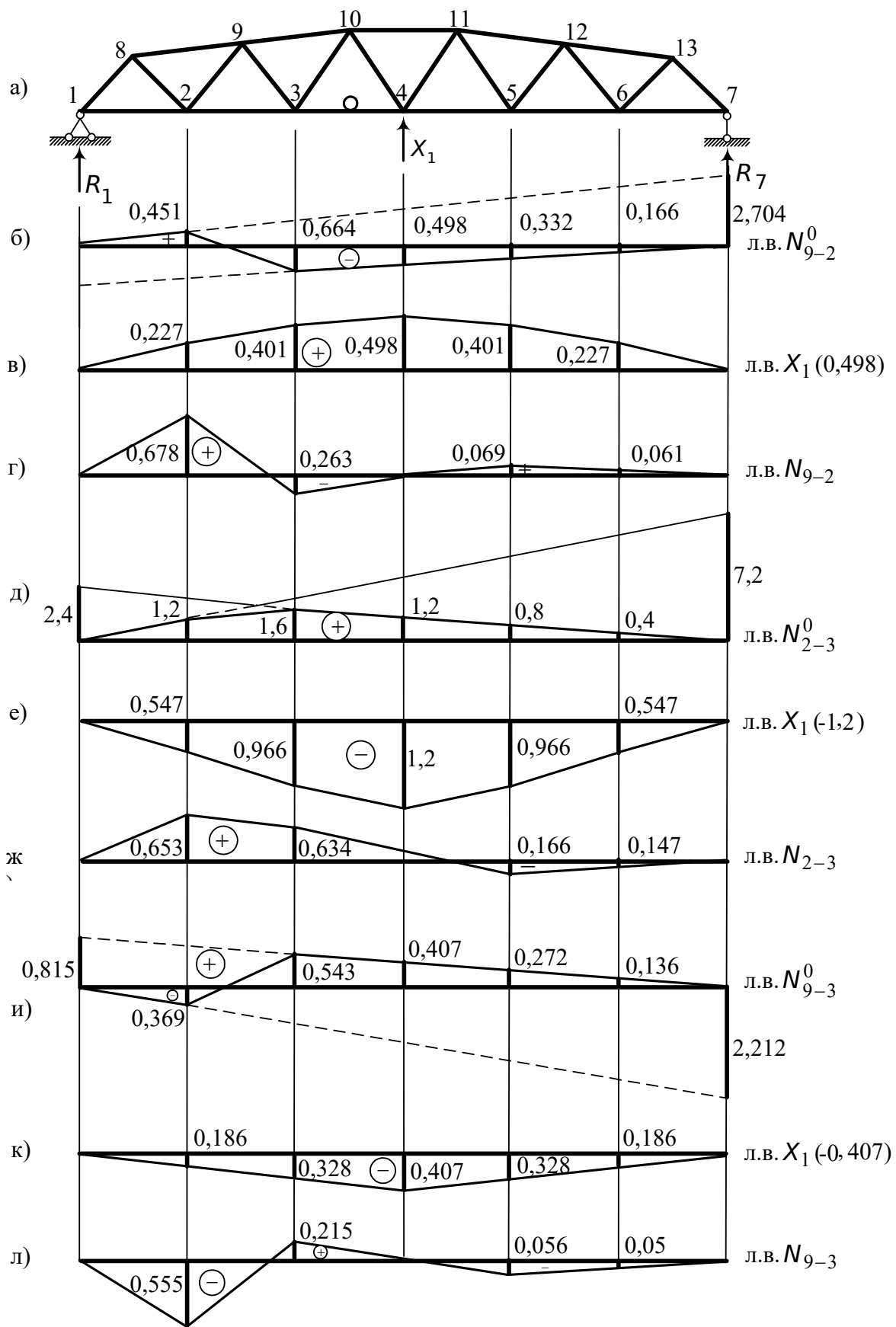


Рисунок 2.14 – Побудова ліній впливу зусиль

Лінія впливу N_{9-3} . Для визначення зусилля від одиничного вантажу в стержні 9-3 проведемо переріз III-III (див. рисунок 2.6): вантаж зліва від перерізу, $\sum M_0^{\text{лп}} = 0$,

$$R_7 \cdot 76 + N_{9-3}^0 \cdot 34,358 = 0, \quad N_{9-3}^0 = -2,212R_7;$$

вантаж $F = 1$ справа від перерізу, $\sum M_0^{\text{лпв}} = 0$,

$$R_1 \cdot 28 - N_{9-3}^0 \cdot 34,358 = 0, \quad N_{9-3}^0 = 0,815R_1.$$

Лінія впливу N_{9-3}^0 зображена на рисунку 2.14, и. Згідно з таблицею 2.2 зусилля в стержні 9-3 від $X_1 = 1$ дорівнює -0,407. Отже, всі ординати лінії впливу X_1 множимо на (-0,407) (див. рисунок 2.14, к). Додаючи ординати лінії впливу N_{9-3}^0 і лінії впливу $X_1(-0,407)$, одержуємо лінію впливу N_{9-3} в заданій статично невизначній фермі (рисунок 2.14, л).

Знайдемо тепер зусилля N_{9-3} за побудованою лінією впливу від заданого нерухомого навантаження (рисунок 2.6)

$$N_{9-3} = -100 \cdot 0,555 + 150 \cdot 0,215 - 50 \cdot 0,056 - 120 \cdot 0,05 = -32,05.$$

Похибка становить $\frac{32,056 - 32,05}{32,056} \cdot 100 = 0,02\%$.

Лінія впливу N_{9-10} . Для визначення зусилля від одиничного вантажу використаємо переріз III-III (рисунок 2.6). Вантаж зліва від перерізу, $\sum M_3^{\text{лп}} = 0$, $R_7 \cdot 32 + N_{9-10}^0 \cdot 5,457 = 0$, $N_{9-10}^0 = -5,864 \cdot R_7$, вантаж справа від перерізу, $\sum M_3^{\text{лпв}} = 0$, $R_1 \cdot 16 + N_{9-10}^0 \cdot 5,457 = 0$, $N_{9-10}^0 = -2,932 \cdot R_1$. Лінія впливу N_{9-10}^0 зображена на рисунку 2.15, б. Лінія впливу X_1 , всі ординати якої помножено на постійне число 1,466 (див. таблицю 2.2), зображена на рисунку 2.15, в, лінія впливу N_{9-10} в заданій статично невизначній фермі показана на рисунку 2.15, г. Знайдемо зусилля за побудованою лінією впливу N_{9-10} :

$$N_{9-10} = -100 \cdot 0,309 - 150 \cdot 0,775 + 50 \cdot 0,203 + 120 \cdot 0,179 = -115,52 \text{ кН.}$$

Похибка становить $\frac{114,598 - 115,52}{114,598} \cdot 100 = 0,8 \%$.

Лінія впливу N_{10-3} . Для визначення зусилля в стержні 10-3 проведемо переріз IV-IV (рисунок 2.6). Вантаж зліва від перерізу, $\sum M_0^{\text{пр}} = 0$, $R_7 \cdot 76 - N_{10-3}^0 \cdot 36,610 = 0$, $N_{10-3}^0 = 2,076 \cdot R_7$; вантаж справа від перерізу, $\sum M_0^{\text{лів}} = 0$, $R_1 \cdot 28 + N_{10-3}^0 \cdot 36,610 = 0$, $N_{10-3}^0 = -0,765 \cdot R_1$. Лінія впливу N_{10-3}^0 показана на рисунку 2.15, д. Лінія впливу X_1 , всі ординати якої помножено на 0,382 (див. таблицю 2.2), зображена на рисунку 2.15, е, а лінія впливу N_{10-3} в заданій фермі – на рисунку 2.15, ж.

Визначимо зусилля:

$$N_{10-3} = 100 \cdot 0,52 + 150 \cdot 0,999 + 50 \cdot 0,052 + 120 \cdot 0,047 = 210,09 \text{ кН.}$$

Похибка становить $\frac{210,371 - 210,09}{210,371} \cdot 100 = 0,13 \%$.

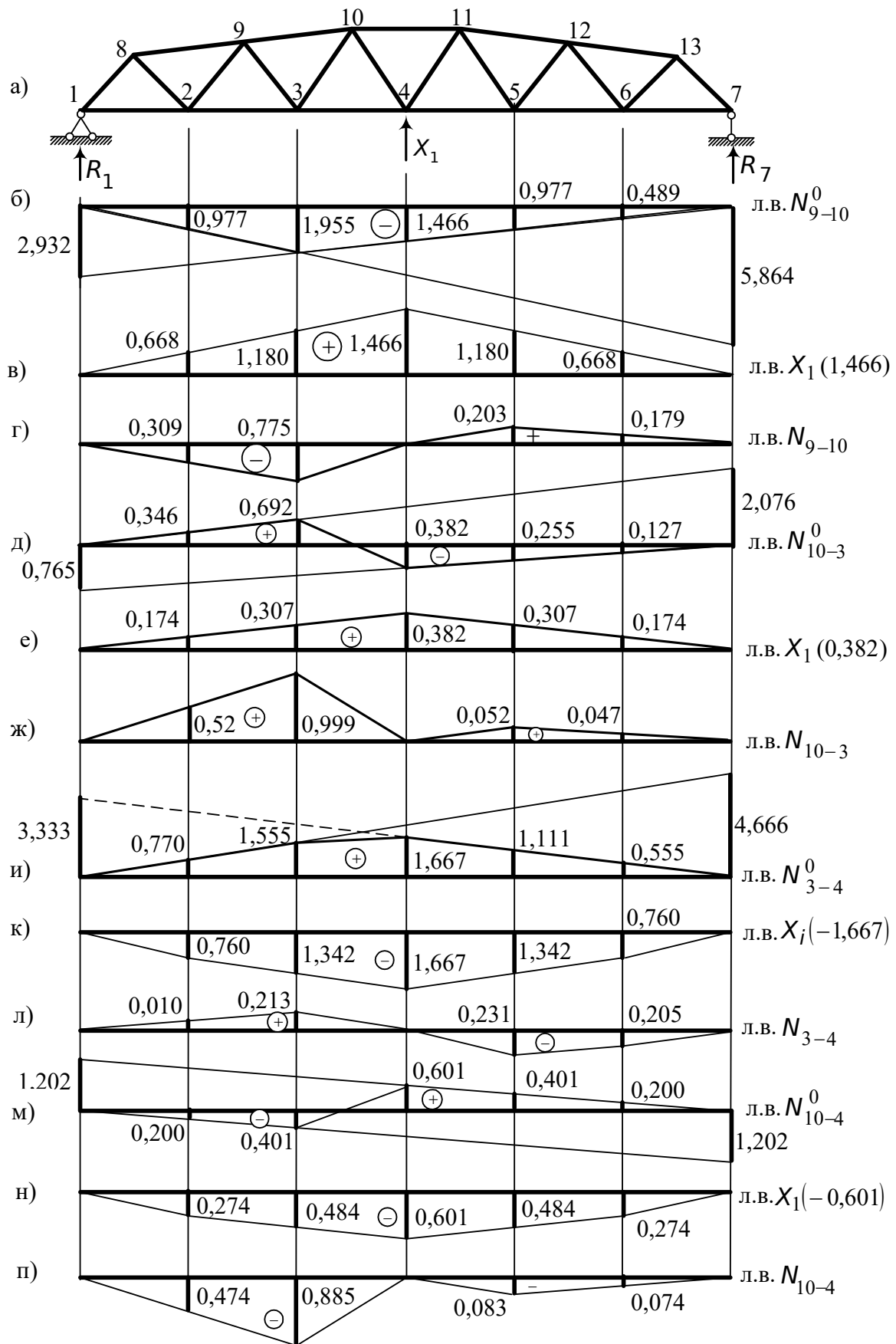


Рисунок 2.15 – Побудова ліній впливу зусиль

Лінія впливу N_{3-4} . Переріз IV-IV (див. рисунок 2.6). Вантаж зліва від перерізу, $\sum M_{10}^{np} = 0$, $R_7 \cdot 28 - N_{3-4}^0 \cdot 6 = 0$, $N_{3-4}^0 = 4,666 \cdot R_7$. Вантаж справа від перерізу, $\sum M_{10}^{лнв} = 0$, $R_1 \cdot 20 - N_{3-4}^0 \cdot 6 = 0$, $N_{3-4}^0 = 3,333 \cdot R_1$. Лінія впливу N_{3-4}^0 зображена на рисунку 2.15, и. Лінія впливу X_1 , всі ординати якої помножено на (-1,667) (див. таблицю 2.2), показана на рисунку 2.15, к. Лінія впливу N_{3-4} в заданій статично невизначній фермі показана на рисунку 2.15, л.

$$\text{Зусилля } N_{3-4} = 100 \cdot 0,10 + 150 \cdot 0,213 - 50 \cdot 0,231 - 120 \cdot 0,206 = -3,2 \text{ кН.}$$

$$\text{Похибка становить } \frac{3,139 - 3,20}{3,139} \cdot 100 = 1,94 \%$$

Лінія впливу N_{10-4} . Для визначення зусилля від $F = 1$ проведемо переріз V-V (див. рисунок 2.6): вантаж зліва від перерізу, $\sum F_y^{np} = 0$, $R_7 + N_{10-4}^0 \cdot \cos 33,69^\circ = 0$, $N_{10-4}^0 = -1,202 \cdot R_7$; вантаж справа від перерізу, $\sum F_y^{лнв} = 0$, $R_1 - N_{10-4}^0 \cdot \cos 33,69^\circ = 0$, $N_{10-4}^0 = 1,202 \cdot R_1$. Лінія впливу N_{10-4}^0 зображена на рисунку 2.15, м. Лінія впливу X_1 , всі ординати якої помножено на (-0,601) (див. таблицю 2.2), показана на рисунку 2.15, н, а лінія впливу N_{10-4} в заданій фермі – на рисунку 2.15, п. Визначимо зусилля:

$$N_{10-4} = -100 \cdot 0,474 - 150 \cdot 0,885 - 50 \cdot 0,083 - 120 \cdot 0,074 = -193,18 \text{ кН.}$$

$$\text{Похибка становить } \frac{193,418 - 193,18}{193,418} \cdot 100 = 0,12 \%$$

Лінії впливу в решті стержнів ферми будуються аналогічно. Можна використати симетрію заданої ферми і одержати, наприклад, лінії впливу N_{11-12} , N_{12-13} , N_{13-7} , N_{6-7} , N_{5-6} , N_{4-5} , N_{11-4} , N_{11-5} , N_{5-12} , N_{12-6} , N_{13-6} , розвернувши побудовані лінії впливу N_{9-10} , N_{8-9} , N_{1-8} , N_{1-2} , N_{2-3} , N_{3-4} , N_{10-4} , N_{3-10} , N_{9-3} , N_{9-2} , N_{8-2} навколо осі симетрії ферми.

2.1.3 Підготовка вхідної інформації для розрахунку статично невизначної ферми на комп'ютері і розрахунок ферми

Інформація, необхідна для розрахунку на комп'ютері статично невизначної ферми на рухоме навантаження, включає загальні дані про ферму, дані про координати вузлів, величини жорсткості для кожного типу поперечного перерізу стержнів ферми.

Підготовка вхідних даних починається із зображення розрахункової схеми ферми і вибору системи координат. Вісь X направляється горизонтально, вісь Y – вертикально. На вибір початку і додатного напрямку координат ніяких обмежень нема.

Вузли ферми нумеруються без пропуску, починаючи з номера один. Першими нумеруються вузли вантажного поясу, потім – решта вузлів ферми. Приклад вибору системи координат і нумерації вузлів ферми наведений на рисунку 2.2.

Загальні дані про ферму включають кількість вузлів ферми, кількість стержнів, число типів поперечних перерізів та число вузлів вантажного поясу.

Дані про координати вузлів ферми записуються у вигляді масиву чисел – координат $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots$. Якщо довжина опорних стержнів не задана, то координати опорних вузлів призначаються такими, щоб довжина цих стержнів дорівнювала $1/20 - 1/25$ загальної довжини ферми.

Далі записуються величини жорсткості для кожного із типів поперечного перерізу стержнів ферми. Жорсткості поперечних перерізів опорних стержнів на декілька порядків перевищують жорсткості поперечного перерізу решти стержнів ферми. Оскільки внутрішні зусилля в статично невизначній фермі не залежать від конкретних величин жорсткостей, а тільки від їх відношень, можна замість жорсткостей поперечних перерізів записувати відношення цих жорсткостей до жорсткості поперечного перерізу якого-небудь стержня ферми.

До списку стержнів заносять всі стержні ферми, включаючи і опорні. Кожний стержень у списку позначається двома цифрами – номерами прилеглих вузлів, відокремленими одна від одної знаком «-». Після коду стержня через пропуск записується порядковий номер елемента з масиву жорсткостей, відповідного даному стержню. Розміщення стержнів у списку довільне.

Підготовлені вхідні дані вводяться в комп'ютер за допомогою текстового редактора з подальшим записом їх на

диск. На рисунку 2.16 показано взаємне розміщення вхідних даних на екрані монітора для наведеної ферми (рисунок 2.2).

```
17 27 3 7
0 0 8 0 16 0 24 0 32 0 40 0 48 0 4 4 12 5 20 6 28 6 36 5
44 4 -1 -1 1 -1 24 -1 48 -1
2 1 1000000
1-2 1 2-3 1 3-4 1 4-5 1 5-6 1 6-7 1 1-8 1 8-9 1
9-10 1 10-11 1 11-12 1 12-13 1 7-13 1 2-8 2 2-9 2
3-9 2 3-10 2 4-10 2 4-11 2 5-11 2 5-12 2 6-12 2
6-13 2 1-14 3 1-15 3 4-16 3 7-17 3
```

Рисунок 2.16 – Розміщення вхідних даних на екрані монітора

В першому рядку вхідних даних наведено:

загальну кількість вузлів ферми – 17;

загальну кількість стержнів ферми – 27;

кількість типів поперечного перерізу стержнів ферми, включаючи і опорні (див. таблицю 2.2) – 3;

кількість вузлів вантажного поясу – 7.

В другому і третьому рядках записані координати вузлів ферми. Довжина опорних стержнів дорівнює 1 м.

В четвертому рядку записані відношення жорсткостей поперечного перерізу стержнів поясів і опорних розкосів, стержнів решітки, а також опорних стержнів до жорсткості стержнів решітки. Наприклад, якщо жорсткості стержнів поясів і опорних розкосів $2EA$, жорсткості стержнів решітки EA і жорсткості опорних стержнів $1000000EA$, ці відношення дорівнюють 2, 1 і 1000000.

У п'ятому і наступних рядках записано список стержнів ферми. Після коду стержня записується посилання на тип поперечного перерізу. Наприклад, стержню 1-2 нижнього поясу відповідає жорсткість, представлена першим числом четвертого рядка, стержню 3-10 решітки відповідає жорсткість, представлена другим числом четвертого рядка і т.д.

Дані на диску розміщуються у файлі, ім'я якого рекомендується складати з імені групи та порядкового номера студента в списку групи. Для цього використовуються цифри і букви латинського алфавіту. Тип файла VAL або DAT.

Програма розрахунку статично невизначних ферм на рухоме навантаження написана алгоритмічною мовою Паскаль і реалізована в системі Turbo Pascal. Текст програми наведено в дод. 2. За допомогою програми вводяться вхідні дані, виконується розрахунок статично невизначної ферми, виводяться на екран монітора розрахункова схема ферми і лінії впливу в усіх стержнях ферми. Передбачена можливість виводу на принтер ординат ліній впливу.

На рисунку 2.17 наведені ординати ліній впливу в стержнях лівої половини ферми.

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 4-16 (лінія впливу X_1 , див. рисунок 2.10, д).

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | -7,48979E-09 |
| 2 | -4,57247E-01 |
| 3 | -8,06156E-01 |
| 4 | -1,00000E+00 |
| 5 | -8,06156E-01 |
| 6 | -4,57247E-01 |
| 7 | -5,29628E-09 |

Рисунок 2.17 – Ординати ліній впливу зусиль у стержнях ферми

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 1-8 (див. рисунок 2.12, г)

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | 5,29656E-09 |
| 2 | -8,55189E-01 |

| | | | | | |
|------------------------|--|---------|-----------|--------------|-----|
| 3 | | | | -3,72771E-01 | |
| 4 | | | | -7,49007E-09 | |
| 5 | | | | 9,86340E-02 | |
| 6 | | | | 8,76199E-02 | |
| 7 | | | | 3,74504E-09 | |
| Ординати лінії впливу | | зусилля | в стержні | | 1-2 |
| (див. рисунок 2.12, ж) | | | | | |

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | -3,74524E-09 |
| 2 | 6,04710E-01 |
| 3 | 2,63589E-01 |
| 4 | 5,29628E-09 |
| 5 | -6,97448E-02 |
| 6 | -6,19666E-02 |
| 7 | -2,64814E-09 |

| | | | | | |
|------------------------|--|---------|-----------|--|-----|
| Ординати лінії впливу | | зусилля | в стержні | | 8-2 |
| (див. рисунок 2.12, л) | | | | | |

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | -4,11909E-09 |
| 2 | 6,65147E-01 |
| 3 | 2,89933E-01 |
| 4 | 5,82561E-09 |
| 5 | -7,67153E-01 |
| 6 | -6,81488E-01 |
| 7 | -2,91281E-09 |

Рисунок 2.17, аркуш 2

| | | | | | |
|------------------------|--|---------|-----------|--|-----|
| Ординати лінії впливу | | зусилля | в стержні | | 8-9 |
| (див. рисунок 2.12, п) | | | | | |

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | 6,71001E-09 |
| 2 | -1,08341E+00 |

| | |
|---|--------------|
| 3 | -4,72249E-01 |
| 4 | -9,48889E-09 |
| 5 | 1,24956E-01 |
| 6 | 1,11002E-01 |
| 7 | 4,74444E-09 |

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 9-2
(див. рисунок 2.14, г)

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | 3,73041E-09 |
| 2 | 6,78309E-01 |
| 3 | -2,62545E-01 |
| 4 | -5,27532E-09 |
| 5 | 6,94687E-02 |
| 6 | 6,17114E-02 |
| 7 | 2,63766E-09 |

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 2-3 (див.
рисунок 3.14, ж)

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | -8,98857E-09 |
| 2 | 6,51304E-01 |
| 3 | 6,32613E-01 |
| 4 | 1,27111E-08 |
| 5 | -1,67387E-01 |
| 6 | -1,48696E-01 |
| 7 | -6,35554E-09 |

Рисунок 2.17, аркуш 3

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 9-10
(див. рисунок 2.15, г)

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | 1,09797E-08 |
| 2 | -3,06982E-01 |
| 3 | -7,72771E-01 |

| | |
|---|--------------|
| 4 | -1,66273E-08 |
| 5 | 2,04473E-01 |
| 6 | 1,81640E-01 |
| 7 | 7,76363E-09 |

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 10-3
(див. рисунок 2.15, ж)

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | 2,86391E-09 |
| 2 | 5,20842E-01 |
| 3 | 1,00025E+00 |
| 4 | -4,05067E-09 |
| 5 | 5,33418E-02 |
| 6 | 4,73853E-02 |
| 7 | 2,02534E-09 |

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 3-4
(див. рисунок 2.15, л)

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | -1,24835E-08 |
| 2 | 1,57001E-02 |
| 3 | 2,11962E-01 |
| 4 | 1,76543E-08 |
| 5 | -2,32483E-01 |
| 6 | -2,06522E-01 |
| 7 | -8,82714E-09 |

Рисунок 2.17, аркуш 4

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 9-3
(див. рисунок 2.14, л)

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | -3,05162E-09 |
| 2 | -5,54980E-01 |
| 3 | 2,14810E-01 |

| | |
|---|--------------|
| 4 | 4,31617E-09 |
| 5 | -5,68380E-02 |
| 6 | -5,04911E-02 |
| 7 | -2,15808E-09 |

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 10-4
(див. рисунок 2.15, п)

| Вузол | Ордината |
|-------|--------------|
| 1 | -4,50067E-09 |
| 2 | -4,75079E-01 |
| 3 | -8,85056E-01 |
| 4 | 6,36534E-09 |
| 5 | -8,38228E-02 |
| 6 | -7,44626E-02 |
| 7 | -3,18267E-09 |

Ординати лінії впливу зусилля в стержні 10-11

| | |
|---|--------------|
| 1 | 1,49800E-08 |
| 2 | 2,47827E-01 |
| 3 | 2,78979E-01 |
| 4 | -2,11851E-08 |
| 5 | 2,78979E-01 |
| 6 | 2,47827E-01 |
| 7 | 1,05926E-08 |

Рисунок 2.17, аркуш 5

Порівняння результатів розрахунків на комп'ютері і вручну вказує на їх повний збіг.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И. Линейное и выпуклое программирование. – М.: Наука, 1964. – 348 с.

2 Матричные алгоритмы в строительной механике стержневых систем /Д.К. Бендюг, Б.Г. Брадул-Кириллов, Ю.И.

Бутенко, А.И. Виноградов, О.П. Дорошенко, Ю.П. Китов, С.П. Фесик. – М.: Высшая школа, 1980. – 123 с.

3 Снитко Н.К. Строительная механика. – 3-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1980. – 431 с.

4 Строительная механика: стержневые системы /А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лащеников, Н.Н. Шапошников. – М.: Стройиздат, 1981. – 512 с.

5 Ржаницын А.Р. Строительная механика. – М.: Высшая школа, 1982. – 400 с.

6 Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 602 с.

7 Определение усилий и перемещений в статически определимых расчетных схемах инженерных сооружений на автомобильных дорогах /Э.Д. Чихладзе, В.Д. Зинченко, В.А. Голеско, А.Г. Кислов. – К.: УМКВО, 1989. – 127 с.

8 Чихладзе Э.Д., Черненко Н.Г. Расчет статически определимых ферм с применением ПЭВМ. – Харьков: ХИИТ, 1993. – 37 с.

9 Черненко Н.Г. Расчет плоских и пространственных статически неопределимых рам на ПЭВМ. – Харьков: ХИИТ, 1993. – 50 с.

Додаток А

РОЗРАХУНОК СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧНИХ ФЕРМ У МАТРИЧНІЙ ФОРМІ

У зв'язку з широким використанням у розрахунках споруд комп'ютера при розв'язанні багатьох задач будівельної механіки

застосовуються матриці. Використання апарату лінійної алгебри спрощує програмування задач будівельної механіки на комп'ютері. Нижче подано матричну форму розрахунку статично невизначних ферм, покладену в основу програми розрахунку, наведеної в дод. А.

Матрична форма методу сил для визначення зусиль у стержнях ферми записується в такому вигляді:

$$N = N_f - \bar{N}(\bar{N}'B\bar{N})^{-1}\bar{N}'B N_f. \quad (\text{A.1})$$

Тут N – матриця внутрішніх зусиль у заданій системі від зовнішнього навантаження;

N_f – матриця внутрішніх зусиль в статично визначній основній системі від зовнішнього навантаження;

\bar{N} – матриця внутрішніх зусиль у статично визначній основній системі від одиничних значень зайвих невідомих;

B – діагональна матриця податливостей стержнів ферми. Елемент b_{ij} матриці податливостей обчислюється за формулою

$$b_{ij} = \frac{\ell_j}{EA_j},$$

де ℓ_j – довжина j -го стержня ферми;

A_j – площа поперечного перерізу j -го стержня ферми;

E – модуль Юнга.

Якщо матриця N_f обчислена від завантаження ферми одиничною силою, розміщеною послідовно у вузлах вантажного поясу, то матриця N збігається з матрицею впливу.

Для вибору основної системи методу сил і обчислення внутрішніх зусиль від одиничних значень зайвих невідомих і зовнішнього навантаження використовується апарат жорданових виключень. У фермі з числом вузлів m та числом стержнів n при розрахунках на одне навантаження система рівнянь рівноваги вузлів має вигляд

$$a_{11}N_1 + a_{12}N_2 + \dots + a_{1s}N_s + \dots + a_{1n}N_n + f_1 = 0$$

$$a_{21}N_1 + a_{22}N_2 + \dots + a_{2s}N_s + \dots + a_{2n}N_n + f_2 = 0$$

.....

$$a_{r1}N_1 + a_{r2}N_2 + \dots + a_{rs}N_s + \dots + a_{rn}N_n + f_r = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$\dots\dots\dots$$

$$a_{2m,1}N_1 + a_{2m,2}N_2 + \dots + a_{2m,s}N_s + \dots + a_{2m,n}N_n + f_{2m} = 0.$$

Коефіцієнти $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{2m,n}$ є косинуси кутів нахилу стержнів до координатних осей X і Y ; f_1, f_2, \dots, f_{2m} - проекції заданого навантаження на координатні осі. Для статично невизначної ферми $n > 2m$. Різниця $p = n - 2m$ є ступінь статичної невизначності ферми.

Систему рівнянь рівноваги можна записати у вигляді такої таблиці.

| | | | | | | | | |
|---------|------------|------------|---------|------------|---------|------------|----------|-------|
| | N_1 | N_2 | \dots | N_s | \dots | N_n | 1 | |
| $0 =$ | a_{11} | a_{12} | \dots | a_{1s} | \dots | a_{1n} | f_1 | (A.3) |
| $0 =$ | a_{21} | a_{22} | \dots | a_{2s} | \dots | a_{2n} | f_2 | |
| \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | |
| $0 =$ | a_{r1} | a_{r2} | \dots | a_{rs} | \dots | a_{rn} | f_r | |
| \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | |
| $0 =$ | $a_{2m,1}$ | $a_{2m,2}$ | \dots | $a_{2m,s}$ | \dots | $a_{2m,n}$ | f_{2m} | |

Кроком звичайного жорданового виключення, проведеним над таблицею (A.3) з розв'язуючим елементом $a_{rs} \neq 0$, з r -м розв'язуючим рядком та s -м розв'язуючим стовпцем, називається операція зміни ролями між залежною змінною $Y_r = 0$ і незалежною N_s , тобто операція розв'язування рівняння

$$a_{r1}N_1 + a_{r2}N_2 + \dots + a_{rs}N_s + \dots + a_{rn}N_n + f_r = 0$$

відносно N_s , підстановки його в решту рівнянь системи (A.2) та запису одержаної системи у вигляді нової таблиці, аналогічної (A.3). Нова таблиця має вигляд

| | | | | | | | | |
|---------|-----------|-----------|---------|----------|---------|-----------|---------|------------------|
| | N_1 | N_2 | \dots | 0 | \dots | N_n | 1 | |
| $0 =$ | b_{11} | b_{12} | \dots | a_{1s} | \dots | b_{1n} | b_1 | : a_{rs} (A.4) |
| $0 =$ | b_{21} | b_{22} | \dots | a_{2s} | \dots | b_{2n} | b_2 | |
| \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | \dots | |
| $N_s =$ | $-a_{21}$ | $-a_{r2}$ | \dots | 1 | \dots | $-a_{rn}$ | $-f_r$ | |

$$\dots \left| \begin{array}{cccc} \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{2m,1} & b_{2m,2} & \dots & a_{2m,s} & \dots & b_{2m,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 = & & & & & b_{2m} \end{array} \right|$$

Один крок жорданового виключення з розв'язуючим елементом a_{rs} переводить таблицю (А.3) в нову таблицю (А.4) за схемою, яка складається з таких правил:

- 1) розв'язуючий елемент замінюється одиницею;
- 2) решта елементів розв'язуючого стовпця лишається без змін;
- 3) решта елементів розв'язуючого рядка змінює лише свої знаки;
- 4) елементи, які не належать розв'язуючому стовпцю або рядку, обчислюються за формулою

$$b_{ij} = a_{ij} a_{rs} - a_{sa} a_{j};$$

5) усі елементи нової таблиці діляться на розв'язуючий елемент a_{rs} .

Для скорочення розрахунку після кожного кроку викреслюється стовпець коефіцієнтів під перекинутим на верх таблиці нулем.

Виконавши послідовно $2m$ кроків жорданових виключень з розв'язуючими стовпцями, відмінних від стовпця вільних членів, одержимо остаточну таблицю в такому вигляді

$$\begin{array}{l}
 N_{2m+1} \quad \dots \quad N_n \quad \mathbf{1} \\
 N_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline C_{1,2m+1} & \dots & C_{1n} & C_1 \\ \hline \end{array} \\
 N_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline C_{2,2m+1} & \dots & C_{2n} & C_2 \\ \hline \end{array} \\
 \dots \dots \dots \\
 N_{2m} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline C_{2m,2m+1} & \dots & C_{2m,n} & C_{2m} \\ \hline \end{array}
 \end{array} \quad (\text{Д.А.5})$$

Зусилля, які залишились наверху таблиці, є зусилля в зайвих зв'язках. Якщо під час жорданових виключень неможливо поміняти місцями $2m$ зусиль, то така ферма є геометрично змінною.

Матриці \bar{N} і N_f зв'язані з таблицею (А.5) так

$$\bar{N} = \begin{pmatrix} \bar{N}_{11} & \dots & \bar{N}_{1,p} \\ \bar{N}_{21} & \dots & \bar{N}_{2,p} \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{N}_{2m,1} & \dots & \bar{N}_{2m,p} \\ \bar{N}_{2m+1,1} & \dots & \bar{N}_{2m+1,p} \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{N}_{n,1} & \dots & \bar{N}_{n,p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1,2m+1} & \dots & C_{1n} \\ C_{2,2m+1} & \dots & C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{2m,2m+1} & \dots & C_{2m,n} \\ \mathbf{1} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{1} \end{pmatrix},$$

$$N_f = \begin{pmatrix} N_{1f} \\ N_{2f} \\ \dots \\ N_{2m,f} \\ N_{2m+1,f} \\ \dots \\ N_{n,f} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_{2m} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Якщо розрахунок ведеться на декілька завантажень, то в таблиці для жорданових виключень потрібно замість одного стовпця помістити число стовпців, рівне числу завантажень.

При завантаженні ферми одиничними зосередженими силами обчислені за формулою (А.1) елементи i -го рядка матриці N є ординати лінії впливу зусилля в i -му стержні статично невизначної ферми.

Додаток Б

ПОБУДОВА ЕПЮРИ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ВУЗЛІВ ВАНТАЖНОГО ПОЯСУ ФЕРМИ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЇ ОПОРНИХ СТОЯКІВ

Задана ферма зображена на рисунку Б.1, а. Зусилля в основній системі від $X_1 = 1$ (рисунок Б.1, б) та від одиничних пар (рисунок Б.1, в, г) наведені в таблиці Б.1. Переміщення опорних стояків 1-6 і 5-10 дорівнюють $1,5/EA$. Відповідно моменти на опорах 6 та 10 фіктивної балки $EAM_6 = EAM_{10} = 1,5$. Епюра вертикальних переміщень показана на рисунку Б.1, д.

Таблиця Б.1 – Визначення пружних вантажів

| Номер стерж- нів | $\ell_i, \text{ м}$ | N_{1i} від $X_1 = 1$ | Зусилля від одиничних пар, прикладених у вузлах | | | |
|------------------------|---------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| | | | Вузол 7 | | Вузол 8 | |
| | | | $N_{\lambda i}$ | $\frac{N_{\lambda i} N_{1i} \ell_i}{EA_i}$ | $N_{\lambda i}$ | $\frac{N_{\lambda i} N_{1i} \ell_i}{EA_i}$ |
| 1-6 | 3 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1-2 | 6,185 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6-7 | 6 | 0,667 | -0,222 | -0,889 | 0 | 0 |
| 6-2 | 7,5 | -0,833 | 0,278 | -1,737 | 0 | 0 |
| 7-2 | 4,5 | 0,333 | -0,111 | -0,166 | 0 | 0 |
| 7-3 | 8,485 | 0,471 | -0,314 | 1,255 | 0,236 | -0,946 |
| 7-8 | 6,0 | 1,0 | 0 | 0 | -0,167 | -1,0 |
| 2-3 | 6,185 | -0,687 | 0,229 | -0,973 | 0 | 0 |
| 8-9 | 6 | 1,0 | 0 | 0 | -0,167 | -1,0 |
| 8-3 | 6 | 0 | 0,167 | 0 | -0,333 | 0 |
| 3-9 | 8,485 | -0,471 | 0 | 0 | 0,236 | -0,943 |
| 3-4 | 6,185 | -0,687 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9-10 | 6 | 0,667 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9-4 | 4,5 | 0,333 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4-5 | 6,185 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4-10 | 7,5 | -0,833 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10-5 | 3 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$$\sum = -\frac{2,51}{EA}; \quad \sum = -\frac{3,886}{EA}.$$

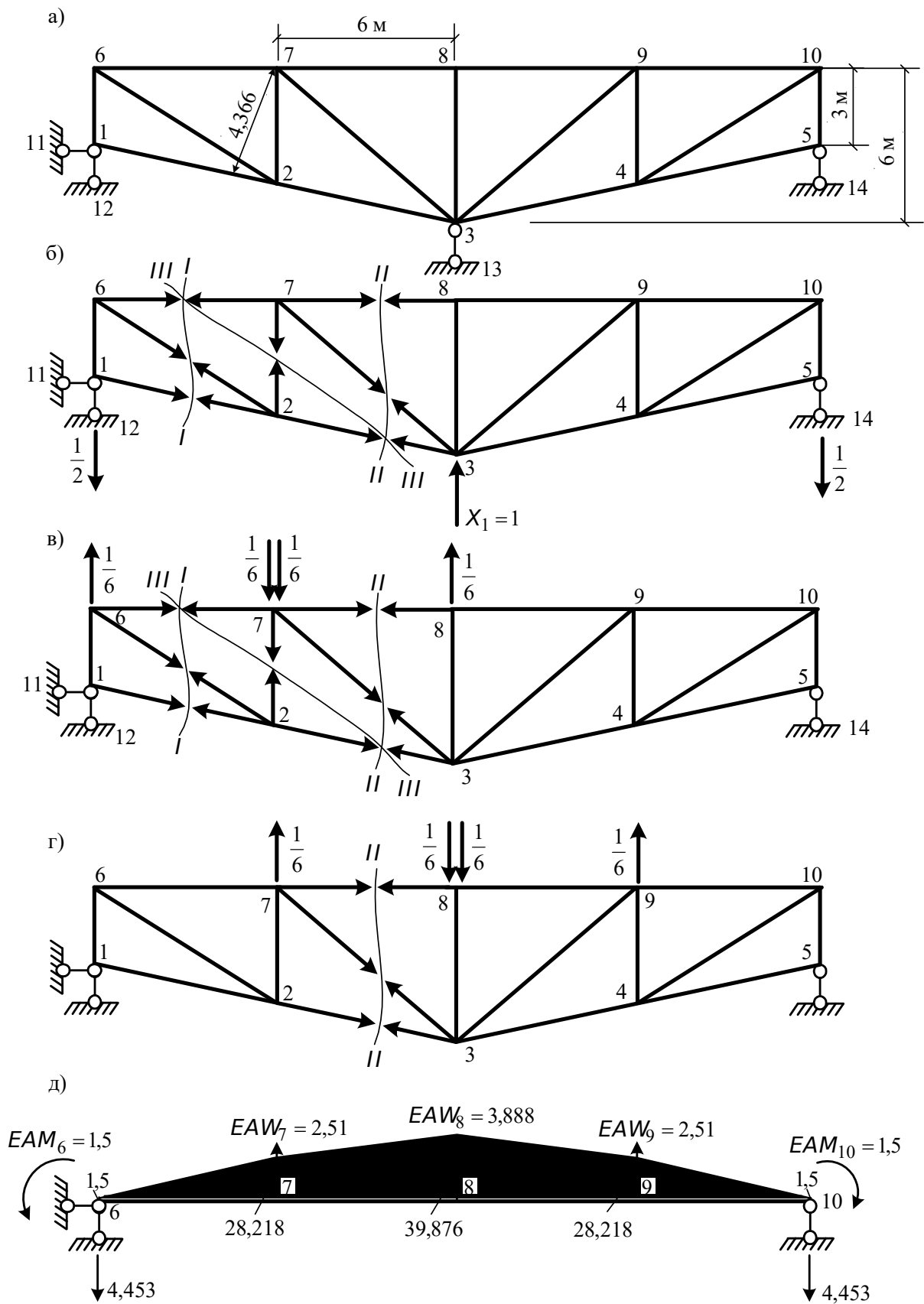


Рисунок Б.1 – Побудова епюри вертикальних переміщень вузлів вантажного поясу ферми

Додаток В

ІНСТРУКЦІЯ ДО ПРОГРАМИ РОЗРАХУНКУ СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧНИХ ФЕРМ НА КОМП'ЮТЕРІ

Для розрахунку на комп'ютері статично невизначних ферм треба:

- 1 Вставити в дисковод А дискету з програмою розрахунку.
- 2 Натиснути клавішу «Пуск» на процесорі.
- 3 На запит операційної системи увести поточну дату і час.
- 4 Після виведення повідомлення про номер диска натиснути

на будь-яку клавішу.

5 Вибрати з меню потрібний вид розрахунку і увести відповідну цифру. На поточній панелі програми *Norton Commander* з'явиться список імен файлів, які містяться в підкаталозі *SI-TRUSS*.

6 Створити файл вхідних даних. Для цього потрібно натиснути одночасно клавішу верхнього регістру [↑] та функціональну клавішу [F4]. Після виводу повідомлення "*Edit the file*" увести ім'я файла і натиснути клавішу [←|]. На запит "*New file*" натиснути клавішу [←|] та увести вхідні дані. Під час уведення вхідних даних можливе їх редагування. Усі зміни в даних, вставка та вилучення окремих символів відбувається в тій позиції, на яку вказує курсор. Після закінчення уводу натиснути послідовно клавіші [F10] та [←|]. На поточній панелі в списку файлів з'явиться ім'я створеного файла.

7 Для редагування вхідних даних після створення файла в списку файлів за допомогою курсору виділити потрібний файл і натиснути клавішу [F4]. За допомогою дій відповідно до п. 6, відредагувати вхідні дані.

8 Для виконання програми розрахунку натиснути послідовно клавіші [R] та [←|]. В подальших діях керуватися запитаними, які виводяться програмою на монітор під час її виконання.

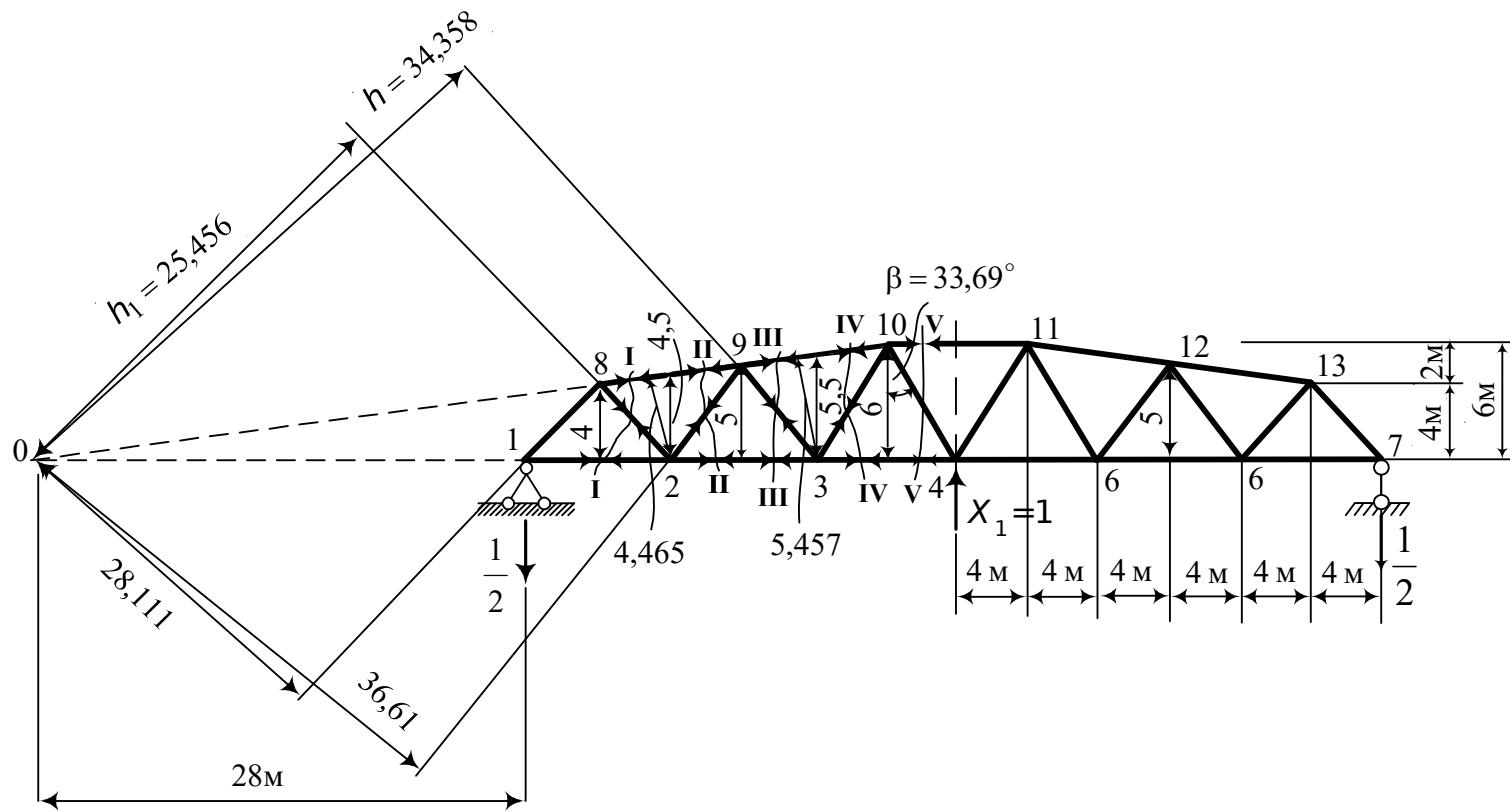


Рисунок 2.4 – До визначення зусиль від $X_1 = 1$

Таблиця 2.2 – Визначення розрахункових зусиль і перевірка їх обчислень

| Номер стержнів | $\ell_i, \text{ м}$ | Площа перерізу | N_{1i} | $\frac{N_{1i}^2 \ell_i}{EA_i}$ | $N_{Fi}, \text{ кН}$ | $\frac{N_{Fi} N_{1i} \ell_i}{EA_i}$ | $N_{\text{розрах.}i}, \text{ кН}$ | $\frac{N_{\text{розрах.}i} \cdot N_{1i} \ell_i}{EA_i}$ |
|----------------|---------------------|----------------|----------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1-8 | 5,657 | 2А | 0,707 | 1,414 | -311,174 | -622,270 | -126,059 | -252,086 |
| 1-2 | 8,00 | 2А | -0,500 | 1,000 | 220 | -440,0 | 89,084 | -178,168 |
| 8-2 | 5,657 | А | -0,550 | 1,711 | 241,986 | -752,903 | 97,979 | -304,847 |
| 8-9 | 8,062 | 2А | 0,896 | 3,236 | -394,177 | -1423,679 | -159,576 | -576,353 |
| 2-3 | 8,00 | 2А | -1,2 | 5,760 | 448 | -2150,40 | 133,803 | -642,254 |
| 2-9 | 6,403 | А | 0,498 | 1,588 | -91,067 | -290,385 | 39,325 | 125,395 |
| 9-3 | 6,403 | А | -0,407 | 1,061 | 74,509 | -194,172 | -32,056 | 83,539 |
| 9-10 | 8,062 | 2А | 1,466 | 8,663 | -498,442 | -2945,516 | -114,598 | -677,211 |
| 3-10 | 7,211 | А | 0,382 | 1,052 | 110,352 | 303,976 | 210,371 | 579,488 |
| 3-4 | 8,00 | 2А | -1,667 | 11,116 | 433,333 | -2889,464 | -3,139 | 20,931 |
| 10-11 | 8,00 | 2А | 2,00 | 16,00 | -413,333 | -3306,664 | 110,329 | 882,632 |
| 10-4 | 7,211 | А | -0,601 | 2,605 | -36,058 | 156,269 | -193,418 | 838,237 |
| 4-11 | 7,211 | А | -0,601 | 2,605 | 36,058 | -156,269 | -121,302 | 525,700 |
| 4-5 | 8,00 | 2А | -1,667 | 11,116 | 393,333 | -2622,744 | -43,139 | 287,651 |
| 11-5 | 7,211 | А | 0,382 | 1,052 | 25,130 | 69,223 | 125,149 | 344,736 |
| 11-12 | 8,062 | 2А | 1,466 | 8,663 | -410,482 | -2425,721 | -26,638 | -157,416 |

| | | | | | | | | |
|------|-------|---|--------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 5-12 | 6,403 | A | -0,407 | 1,061 | 37,255 | -97,087 | -69,310 | 180,623 |
|------|-------|---|--------|-------|--------|---------|---------|---------|

Продовження таблиці 2.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|-------|----|--------|-------|----------|---------------|----------|----------|
| 5-6 | 8,00 | 2A | -1,2 | 5,760 | 384 | -1843,20 | 69,803 | -335,054 |
| 12-6 | 6,403 | A | 0,498 | 1,588 | -45,334 | -144,556 | 85,108 | 271,384 |
| 12-13 | 8,062 | 2A | 0,896 | 3,236 | -358,343 | - 1294,255 | -123,742 | -446,928 |
| 6-13 | 5,657 | A | -0,550 | 1,711 | 219,987 | -684,457 | 75,980 | -236,400 |
| 6-7 | 8,00 | 2A | -0,500 | 1,00 | 200 | -400 | 69,085 | -138,170 |
| 13-7 | 5,657 | 2A | 0,707 | 1,414 | -282,885 | -565,699 | -97,770 | -195,516 |

$$\sum_{i=1}^n = \frac{94,412}{EA}; \quad \sum_{i=1}^n = -\frac{24719,973}{EA}; \quad \sum_{i=1}^n = 0,087.$$

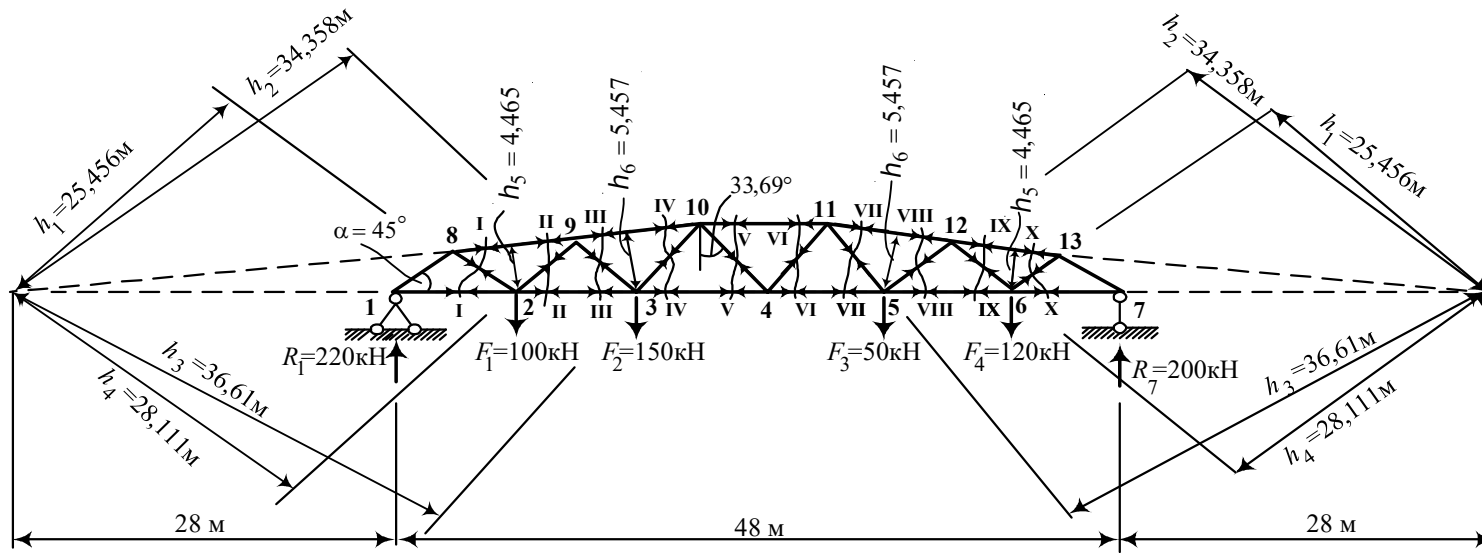


Рисунок 2.6 – До визначення зусиль від зовнішніх сил

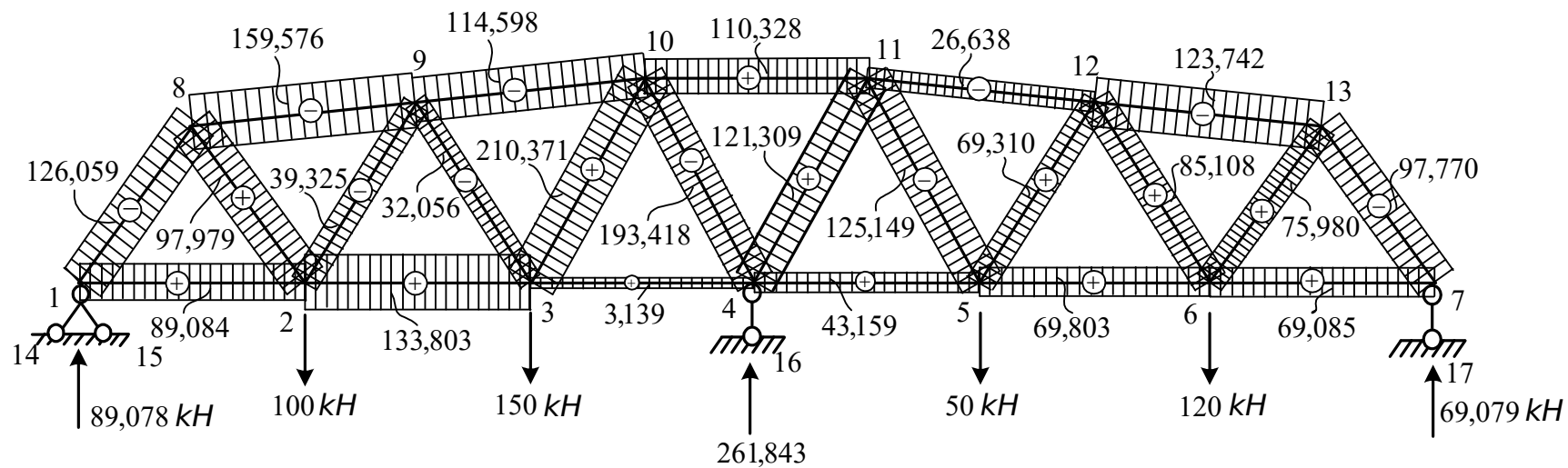


Рисунок 2.9 – Епюра розрахункових зусиль у стержнях статично невизначної ферми

Таблиця 2.3 – Визначення пружних вантажів

| Номери стержнів | ℓ_i , м | Площі перерізу стержнів | N_{1i} | Зусилля від одиничних пар, прикладених у вузлах | | | | | | |
|-----------------|--------------|-------------------------|----------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|--------|
| | | | | Вузол 2 | | Вузол 3 | | Вузол 4 | | |
| | | | | $\bar{N}_{\lambda i}$ | $\frac{\bar{N}_{\lambda i} N_{1i} \ell_i}{EA_i}$ | $\bar{N}_{\lambda i}$ | $\frac{\bar{N}_{\lambda i} N_{1i} \ell_i}{EA_i}$ | $\bar{N}_{\lambda i}$ | $\frac{\bar{N}_{\lambda i} N_{1i} \ell_i}{EA_i}$ | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1-8 | 5,657 | 2А | 0,707 | -0,177 | -0,354 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1-2 | 8,00 | 2А | -0,500 | 0,125 | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8-2 | 5,657 | А | -0,550 | 0,137 | -0,426 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8-9 | 8,062 | 2А | 0,896 | -0,224 | -0,809 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2-3 | 8,00 | 2А | -1,2 | 0,1 | -0,480 | 0,100 | -0,48 | 0 | 0 | 0 |
| 2-9 | 6,403 | А | -0,498 | 0,196 | 0,625 | -0,160 | -0,510 | 0 | 0 | 0 |
| 9-3 | 6,403 | А | -0,407 | -0,160 | 0,417 | 0,131 | -0,341 | 0 | 0 | 0 |
| 9-10 | 8,062 | 2А | 1,466 | 0 | 0 | -0,183 | -1,081 | 0 | 0 | 0 |
| 3-10 | 7,211 | А | 0,382 | 0 | 0 | 0,177 | 0,488 | -0,150 | -0,413 | -0,413 |
| 3-4 | 8,00 | 2А | -1,667 | 0 | 0 | 0,083 | -0,553 | 0,083 | -0,553 | -0,553 |
| 10-11 | 8,00 | 2А | 2,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0,167 | -1,336 | -1,336 |
| 10-4 | 7,211 | А | -0,601 | 0 | 0 | -0,150 | 0,650 | 0,150 | 0,650 | 0,650 |

Продовження таблиці 2.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------|-----------|----|--------|---|---|---|---|------------|--------|
| 4-11 | 7,21 1 | A | -0,601 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,150 | -0,650 |
| 4-5 | 8,00 | 2A | -1,667 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,083 | -0,553 |
| 11-5 | 7,21 1 | A | 0,382 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0,150 | -0,413 |
| 11-12 | 8,06 2 | 2A | 1,466 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5-12 | 6,40 3 | A | -0,407 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5-6 | 8,00 | 2A | -1,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12-6 | 6,40 3 | A | 0,498 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12-13 | 8,06 2 | 2A | 0,896 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6-13 | 5,66 7 | A | -0,550 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6-7 | 8,00 | 2A | -0,500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13-7 | 5,66 7 | 2A | 0,707 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$$\sum_{i=1}^n = -\frac{1,277}{EA};$$

$$\sum_{i=1}^n = -\frac{1,827}{EA};$$

$$\sum_{i=1}^n = -\frac{4,568}{EA}.$$