

УДК 624.072

## ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ БАЛОЧНЫХ ФЕРМ

М.М. ПАРУСОВА

(Представлено: канд. техн. наук, доцент Л.С. ТУРИЩЕВ)

Рассматривается формализованное описание геометрического очертания расчетной схемы балочной фермы и её числовых характеристик с помощью матриц. В пакете MathCAD составлены программы их формирования.

Среди встречающихся в строительной практике стержневых конструкций весьма широкий класс образуют балочные фермы, применяемые в качестве несущих конструкций покрытий зданий и сооружений различного назначения. К числу узловых вопросов, связанных с расчетом ферменных конструкций на ЭВМ, относится (машинный) ввод информации о геометрии (машинное описание топологии) расчетной схемы конструкции. В проектной практике для расчетов несущих конструкций обычно используют программные комплексы Лира и Склад. Вместе с тем использование программных комплексов является затруднительным для управления и оптимизации НДС ферменных конструкций при изменении их параметров. Наиболее просто вопросами управления и оптимизации НДС несущих конструкций можно заниматься в математическом пакете MathCAD. Этот пакет получил мировое распространение в инженерных расчетах.

Рассматривается балочная ферма с произвольным очертанием поясов (прямоугольное, треугольное, трапециевидальное, полигональное) и следующими 3 типами простых решеток:

- 1 тип – раскосная решетка с восходящими раскосами;
- 2 тип – раскосная решетка с нисходящими раскосами;
- 3 тип – треугольная решетка с дополнительными стойками.

Расчетная схема фермы характеризуется следующими числовыми параметрами:

- пролет фермы –  $L$ ;
- высота фермы –  $H$ ;
- число панелей –  $p$ ;
- число узлов –  $n$ , в том числе  $m$  внутренних узлов и  $n-m$  опорных узлов;
- число стержней –  $s$ ;
- число опорных стержней –  $r$ .

Топологическое описание расчетной схемы фермы основывается на матричном описании геометрической структуры и её числовых характеристик.

Для матричного описания геометрической структуры расчетной схемы фермы формируются следующие матрицы:

- матрица геометрической структуры;
- матрица инциденций.

Прямоугольная матрица геометрической структуры имеет размеры  $3 \times s$  и описывает формализованную информацию о стержнях фермы. Первая строка содержит номера стержней, вторая – номера начальных узлов фермы, третья – номера конечных узлов фермы. Для ферм любой мерности матрица имеет вид

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & j & \dots & s \\ b_1 & b_2 & \dots & b_j & \dots & b_s \\ e_1 & e_2 & \dots & e_j & \dots & e_s \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $j$  – номер стержня;  $b_j$  ( $j = 1, \dots, s$ ) – номер начального узла  $j$  – того стержня;  $e_j$  ( $j = 1, \dots, s$ ) – номер конечного узла  $j$  – того стержня.

Принимается следующий порядок нумерации стержней фермы:

- нумерация элементов нижнего пояса

$$j = 1, 2, \dots, p,$$

- нумерация элементов верхнего пояса

$$j = p + 1, p + 2, \dots, 2p,$$

- нумерация стоек

$$j = 2p + 1, 2p + 2, \dots, 3p + 1,$$

- нумерация раскосов

$$j = 3p + 2, \dots, 4p + 1.$$

Связь нумерации узлов элементов поясов и стоек с их номерами и числом панелей фермы не зависит от типа решетки и описывается следующими соотношениями:

- узлы элементов нижнего пояса

$$b_j = j \quad e_j = j + 1 \quad (1 \leq j \leq p),$$

- узлы элементов верхнего пояса

$$b_j = j + 1 \quad e_j = j + 2 \quad (p + 1 \leq j \leq 2p),$$

- узлы стоек

$$b_j = j - 2p \quad e_j = j - (p - 1) \quad (2p + 1 \leq j \leq 3p + 1).$$

Связь нумерация узлов раскосов с их номерами зависит от типа решетки и описывается следующими соотношениями:

- 1 тип решетки:

$$b_j = j - (3p + 1) \quad e_j = j - (2p - 1) \quad (3p + 2 \leq j \leq 4p + 1),$$

- 2 тип решетки:

$$b_j = j - 3p \quad e_j = j - 2p \quad (3p + 2 \leq j \leq 4p + 1),$$

- 3 тип решетки:

- нечетные панели

$$b_j = j - (3p + 1) \quad e_j = j - (2p - 1) \quad (p_j = 1, 3, 5, \dots),$$

- четные панели

$$b_j = p_j + 1 \quad e_j = j - 2p \quad (p_j = 2, 4, 6, \dots).$$

Прямоугольная матрица инцидентий [1] описывает взаимосвязь между номерами стержней фермы и номерами их начальных и конечных узлов. Размеры матрицы  $n \times s$  и она имеет вид

$$d = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1s} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{ns} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В этой матрице каждому стержню фермы соответствует столбец, а каждому узлу – строка. Если стержень номера  $j$  начинается в узле  $b_j$  и заканчивается в узле  $e_j$ , то элементы соответствующего ему столбца матрицы могут принимать следующие значения

$$-1 \quad \text{если } i = b_j$$

$$d_{ij} = +1 \quad \text{если } i = e_j$$

$$0 \quad \text{если } i \neq b_j \text{ и } i \neq e_j$$

Листинг программы формирования матрицы инцидентий в пакете MathCAD приведен на рисунке 1.

Для матричного описания числовых характеристик геометрической структуры фермы в декартовой системе координат используются:

- матрица координат узлов;
- матрица проекций длин стержней;
- вектор длин стержней;
- матрица направляющих косинусов стержней.

Прямоугольная матрица координат имеет размеры  $2n \times l$  и описывает координаты узлов фермы в заданной координатной системе

$$z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Прямоугольная матрица проекций длин стержней фермы на координатные оси имеет размеры  $2 \times s$

$$\Delta = \begin{pmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \dots & \Delta_{1s} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \Delta_{2s} \end{pmatrix} \quad (4)$$

и её элементы связаны с элементами матриц (2) и (3) следующей формулой [1]

$$\Delta_{jk} = \sum_{i=1}^n z_{ki} d_{ij}.$$

Вектор длин стержней фермы имеет вид

$$l = \begin{pmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_j \\ \vdots \\ l_s \end{pmatrix} \quad (5)$$

и его элементы связаны с элементами матрицы (4) следующей формулой

$$l_j = \sqrt{\sum_{k=1}^2 \Delta_{jk}^2}$$

Прямоугольная матрица направляющих косинусов стержней фермы имеет размеры  $2 \times s$

$$c = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1s} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2s} \end{pmatrix} \quad (6)$$

и её элементы связаны с элементами матрицы (4) и вектора (5) следующей формулой

$$c_{jk} = \frac{\Delta_{jk}}{l_j}$$

Полученные формулы (1–6) позволяют формализовано с помощью матриц описывать топологию расчетной схемы балочных ферм и могут использоваться при их численном расчете в пакете MathCAD с использованием разрешающих уравнений строительной механики [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Перельмутер А. Основы расчета вантово-стержневых систем. – М.: Стройиздат, 1969. – 180 с.
2. Алгоритмы построения разрешающих уравнений механики стержневых систем./А.П. Филин, О.Д. Тананайко, И.М. Чернева, М.А. Шварц – Л.: Стройиздат, 1983. – 228 с.