

*МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ*  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського  
„Харківський авіаційний інститут”

**І.Г. Шебанов**

**ДИНАМІЧНИЙ СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ АВІАЦІЙНИХ  
МЕХАНІЗМІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕОМ.  
СИЛОВИЙ РОЗРАХУНОК**

Навчальний посібник

**Харків „ХАІ” 2003**

УДК 629.735.33-2.018:681.3 (075.8)

Динамічний синтез та аналіз авіаційних механізмів з використанням ЕОМ. Силовий розрахунок – Навч. посібник./ І.Г. Шебанов. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т „Харків. авіац. ін-т”, 2003. – 47 с.

Розглянуто силовий розрахунок механізмів другого класу, наведено алгоритми визначення реакцій у кінематичних парах структурних груп другого класу першого, другого видів та силового розрахунку вхідних ланок механізмів.

Для студентів, що вивчають дисципліну ТМ і ТММ.

Іл. 6. Бібліогр.: 3 назви

Рецензенти: канд. фіз.-мат. наук О.О. Гончаренко,  
канд. техн. наук, доц. В.І. Іщенко

© Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
„Харківський авіаційний інститут”, 2003 р.

## ЗМІСТ

1. Силовий розрахунок плоских важільних механізмів методом кінетостатики . . . . .	4
1.1. Урахування сил інерції . . . . .	4
1.2. Послідовність силового розрахунку механізмів другого класу зі степенем рухомості $W = 1$ . . . . .	5
1.3. Визначення реакцій у кінематичних парах структурних груп . . . . .	5
1.3.1. Структурна група другого класу першого виду . . . . .	5
1.3.2. Структурна група другого класу другого виду . . . . .	16
1.3.3. Структурна група другого класу третього виду . . . . .	25
1.4. Силовий розрахунок вхідної ланки механізму . . . . .	35
1.4.1. Силовий розрахунок, якщо енергія від двигуна до вхідної ланки робочої машини (виконавчого механізму) передається зубчастою передачею . . . . .	35
1.4.2. Силовий розрахунок, якщо енергія від двигуна до вхідної ланки робочої машини (виконавчого механізму) передається за допомогою муфти . . . . .	40
Бібліографічний список . . . . .	46

## 1. Силовий розрахунок плоских важільних механізмів методом кінестатики

Силовий розрахунок важільних механізмів полягає у визначенні сил, які діють на окремі ланки механізму. Це потрібно для розрахунку на міцність окремих деталей, визначення потужності приводу, тертя в кінематичних парах, коефіцієнта корисної дії механізму тощо.

Силовий розрахунок може бути виконаний різними методами. У теорії механізмів і машин застосовується метод кінестатики.

### 1.1. Урахування сил інерції

Урахування сил інерції здійснюється у передбаченні, що ланки механізмів мають площину симетрії, паралельну площині руху. Тоді сили інерції можуть бути зведені:

а) до головного вектора  $\overline{F}_{in}$  і головного моменту  $\overline{M}_{in}$  - при плоскопаралельному русі ланки та нерівномірному обертальному русі ланки навколо осі, що не проходить через центр мас (рис. 1.1, а, б):

$$\overline{F}_{in} = -m\overline{W}_s, \quad (1.1)$$

$$\overline{M}_{in} = -J_s\overline{\varepsilon}, \quad (1.2)$$

де  $m$  і  $J_s$  - маса та момент інерції ланки відносно осі, що проходить через центр мас;  $\overline{W}_s$  та  $\overline{\varepsilon}$  - прискорення центру мас і кутове прискорення ланки;

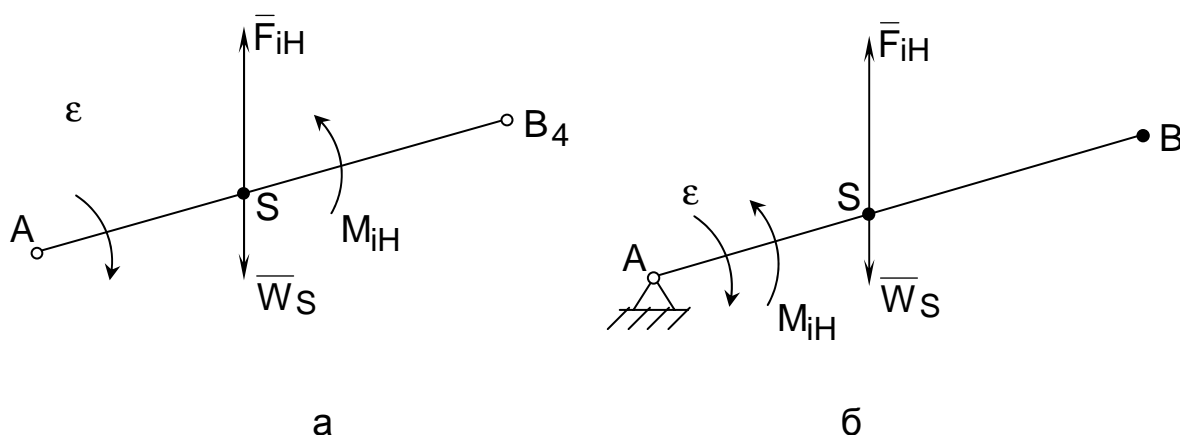


Рис. 1.1

б) до головного вектора сил інерції  $\overline{F}_{in} (\overline{M}_{in} = 0)$  при поступальному нерівномірному русі ланки і рівномірному обертальному русі ланки відносно осі, що не проходить через центр мас;

в) до головного моменту сил інерції  $\overline{M}_{in} (\overline{F}_{in} = 0)$  при нерівномірному обертальному русі ланки навколо осі, що проходить через центр мас.

## **1.2. Послідовність силового розрахунку механізмів другого класу зі ступенем рухомості $W=1$**

1. З механізму виділяють структурну групу, останню у порядку нашарування. До ланок прикладаються сили, що на них діють (зовнішні, сили інерції реакції ланок, від яких відокремлена ця група),\* визначають реакції у кінематичних парах групи).

2. Виділяють структурну групу, передостанню у порядку нашарування. До ланок групи прикладаються всі сили, у тому числі вже відомі реакції від групи, останньої у порядку нашарування. Визначають реакції в кінематичних парах групи. Наступна структурна група розраховується аналогічно.

3. Виконують силовий розрахунок вхідної ланки механізму. До вхідної ланки прикладаються сили, що на неї діють, у тому числі вже відома реакція від структурної групи, першої у порядку нашарування. Визначають реакцію в кінематичній парі, що утворюється вхідною ланкою та стояком, і зрівноважувальну силу або зрівноважувальний момент.

## **1.3. Визначення реакції у кінематичних парах структурних груп**

### **1.3.1. Структурна група другого класу першого виду (рис. 1.2)**

Дано:  $l_{BA}, l_{BC}$  - довжини ланок 2 і 3;  $l_{AS_2}, l_{BS_2}$  - розміри, що визначають положення центрів мас  $S_2$  та  $S_3$  на ланках;  $\varphi_2, \varphi_3$  - напрямні кути векторів  $\overline{AB}$  та  $\overline{CB}$ ;  $F_2, F_3$  - значення головних векторів зовнішніх сил, що включають головні вектори сил інерції;

---

\* Сили тертя вважаються малими і тому при силовому розрахунку не враховуються.

$\gamma_2, \gamma_3$  - напрямні кути головних векторів  $\bar{F}_2$  та  $\bar{F}_3$ ;  $M_2, M_3$  - алгебричні величини головних моментів зовнішніх сил, що включають головні моменти сил інерції.

За додатні приймаються кути  $\varphi_i, \gamma_i$ , напрямки яких відраховуються від напрямку осі OX (рис. 1.2) проти ходу годинникової стрілки.

Необхідно визначити реакції в кінематичних парах структурної групи  $\bar{R}_{12}, \bar{R}_{23} = -\bar{R}_{32}; \bar{R}_{43}$ .

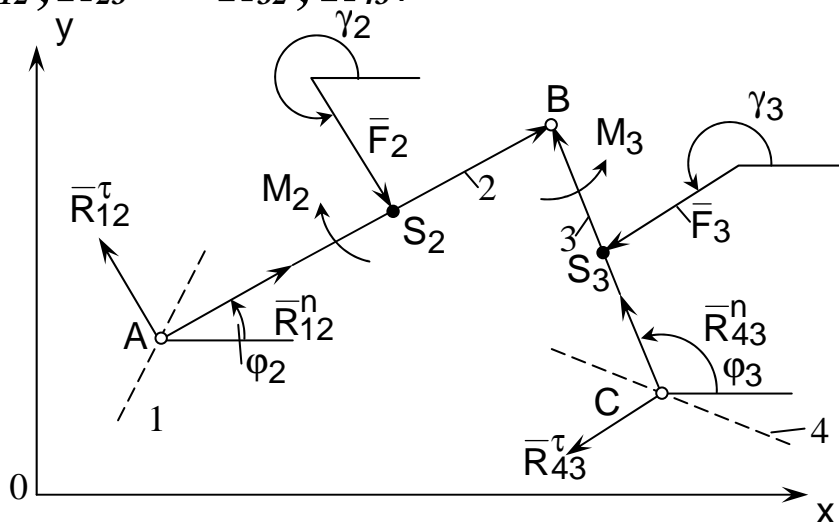


Рис. 1.2

У шарнірах  $A$  та  $C$  реакції розкладаються на дві взаємно перпендикулярні складові:

$$\bar{R}_{12} = \bar{R}_{12}^n + \bar{R}_{12}^\tau; \bar{R}_{43} = \bar{R}_{43}^n + \bar{R}_{43}^\tau.$$

Попередній напрямок реакцій  $\bar{R}_{12}^n$  та  $\bar{R}_{43}^n$  приймається таким, щоб їх напрямні кути  $\gamma_{ij}^n$  збігалися з напрямними кутами ланок  $\varphi_k$ , тобто  $\gamma_{12}^n = \varphi_2$ ;  $\gamma_{43}^n = \varphi_3$ .

Попередній напрямок реакцій  $\bar{R}_{12}^\tau$  та  $\bar{R}_{43}^\tau$  одержують поворотом  $\bar{R}_{12}^n$  та  $\bar{R}_{43}^n$  на кут  $0,5\pi$  проти ходу годинникової стрілки:

$$\gamma_{12}^\tau = \varphi_2 + 0,5\pi; \gamma_{43}^\tau = \varphi_3 + 0,5\pi.$$

Величину реакції  $\overline{\mathbf{R}}_{12}^\tau$  знаходять із рівняння моментів

$$\Sigma \mathbf{M}_{B_2} = \overline{\ell}_{BA} \times \overline{\mathbf{R}}_{12}^\tau + \overline{\ell}_{BS_2} \times \overline{\mathbf{F}}_2 + \overline{\mathbf{M}}_2 = \mathbf{0}, \quad (1.3)$$

або

$$\begin{aligned} & \overline{k} \left| \begin{array}{l} \overline{\ell}_{BA} \cos(\varphi_2 + \pi) \overline{\ell}_{BA} \sin(\varphi_2 + \pi) \\ \overline{\mathbf{R}}_{12}^\tau \cos(\varphi_2 + 0,5\pi) \overline{\mathbf{R}}_{12}^\tau \sin(\varphi_2 + 0,5\pi) \end{array} \right| + \\ & + \overline{k} \left| \begin{array}{l} \overline{\ell}_{BS_2} \cos(\varphi_2 + \pi) \overline{\ell}_{BS_2} \sin(\varphi_2 + \pi) \\ \mathbf{F}_2 \cos \gamma_2 \quad \mathbf{F}_2 \sin \gamma_2 \end{array} \right| + \overline{\mathbf{M}}_2 = \mathbf{0}, \quad (1.4) \end{aligned}$$

звідки 
$$\mathbf{R}_{12}^\tau = \frac{\mathbf{F}_2 \overline{\ell}_{BS_2} \sin(\varphi_2 - \gamma_2) + \mathbf{M}_2}{\overline{\ell}_{BA}}. \quad (1.5)$$

Якщо чисельне значення правої частини виразу (1.5) одержується зі знаком мінус, то  $\gamma_{12}^\tau = \varphi_2 - 0,5\pi$ .

Величину реакції  $\overline{\mathbf{R}}_{43}^\tau$  визначають із рівняння моментів

$$\Sigma \mathbf{M}_{B_3} = \overline{\ell}_{BC} \times \overline{\mathbf{R}}_{43}^\tau + \overline{\ell}_{BS_3} \times \overline{\mathbf{F}}_3 + \overline{\mathbf{M}}_3 = \mathbf{0}, \quad (1.6)$$

або

$$\begin{aligned} & \overline{k} \left| \begin{array}{l} \overline{\ell}_{BC} \cos(\varphi_3 + \pi) \overline{\ell}_{BC} \sin(\varphi_3 + \pi) \\ \overline{\mathbf{R}}_{43}^\tau \cos(\varphi_3 + 0,5\pi) \overline{\mathbf{R}}_{43}^\tau \sin(\varphi_3 + 0,5\pi) \end{array} \right| + \\ & + \overline{k} \left| \begin{array}{l} \overline{\ell}_{BS_3} \cos(\varphi_3 + \pi) \overline{\ell}_{BS_3} \sin(\varphi_3 + \pi) \\ \mathbf{F}_3 \cos \gamma_3 \quad \mathbf{F}_3 \sin \gamma_3 \end{array} \right| + \overline{\mathbf{M}}_3 = \mathbf{0}, \quad (1.7) \end{aligned}$$

звідки 
$$\mathbf{R}_{43}^\tau = \frac{\mathbf{F}_3 \overline{\ell}_{BS_3} \sin(\varphi_3 - \gamma_3) + \mathbf{M}_3}{\overline{\ell}_{BC}}. \quad (1.8)$$

Якщо чисельне значення правої частини виразу (1.8) одержується зі знаком мінус, то  $\gamma_{43}^{\tau} = \varphi_3 - 0,5\pi$ .

Для визначення реакцій  $\overline{R}_{12}^n$  та  $\overline{R}_{43}^n$  запишемо векторне рівняння (1.9) рівноваги структурної групи:

$$\overline{R}_{12}^n + \overline{R}_{12}^{\tau} + \overline{F}_2 + \overline{F}_3 + \overline{R}_{43}^{\tau} + \overline{R}_{43}^n = 0. \quad (1.9)$$

Проектуючи вектори сил на координатні осі, дістанемо

$$\begin{aligned} R_{12}^n \cos \varphi_2 + |R_{12}^{\tau}| \cos \gamma_{12}^{\tau} + F_2 \cos \gamma_2 + F_3 \cos \gamma_3 + \\ + |R_{43}^{\tau}| \cos \gamma_{43}^{\tau} + R_{43}^n \cos \varphi_3 = 0, \\ R_{12}^n \sin \varphi_2 + |R_{12}^{\tau}| \sin \gamma_{12}^{\tau} + F_2 \sin \gamma_2 + F_3 \sin \gamma_3 + \\ + |R_{43}^{\tau}| \sin \gamma_{43}^{\tau} + R_{43}^n \sin \varphi_3 = 0. \end{aligned}$$

Перепишемо ці вирази у вигляді

$$\begin{aligned} R_{12}^n \cos \varphi_2 + R_{43}^n \cos \varphi_3 = -(|R_{12}^{\tau}| \cos \gamma_{12}^{\tau} + F_2 \cos \gamma_2 + \\ + F_3 \cos \gamma_3 + |R_{43}^{\tau}| \cos \gamma_{43}^{\tau}), \\ R_{12}^n \sin \varphi_2 + R_{43}^n \sin \varphi_3 = -(|R_{12}^{\tau}| \sin \gamma_{12}^{\tau} + F_2 \sin \gamma_2 + \\ + F_3 \sin \gamma_3 + |R_{43}^{\tau}| \sin \gamma_{43}^{\tau}). \end{aligned} \quad (1.10)$$

Позначивши праві частини рівнянь (1.10) відповідно (-А) та (-В), маємо

$$\begin{aligned} R_{12}^n \cos \varphi_2 + R_{43}^n \cos \varphi_3 = -A, \\ R_{12}^n \sin \varphi_2 + R_{43}^n \sin \varphi_3 = -B. \end{aligned}$$

Розв'язуючи систему рівнянь (1.10), знаходимо  $R_{12}^n$  та  $R_{43}^n$ :



$$R_{12}^n = -\frac{A \sin \varphi_3 - B \cos \varphi_3}{\sin(\varphi_3 - \varphi_2)},$$

$$R_{43}^n = -\frac{A \sin \varphi_2 - B \cos \varphi_2}{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}.$$

Якщо  $R_{12}^n < 0$ , то  $\gamma_{12}^n = \varphi_2 + \pi$ ; якщо  $R_{43}^n < 0$ , то  $\gamma_{43}^n = \varphi_3 + \pi$ .

Знайдемо значення реакцій  $\bar{R}_{12}$  та  $\bar{R}_{43}$ :

$$R_{12} = \sqrt{(R_{12}^n)^2 + (R_{12}^\tau)^2}, \quad (1.11)$$

$$R_{43} = \sqrt{(R_{43}^n)^2 + (R_{43}^\tau)^2} \quad (1.12)$$

та напрямні кути векторів  $\bar{R}_{12}$  та  $\bar{R}_{43}$ :

$$\gamma_{12} = \varphi_2 + \arctg \frac{R_{12}^\tau}{R_{12}^n}, \text{ якщо } \gamma_{12}^n = \varphi_2, \quad (1.13)$$

$$\gamma_{12} = \varphi_2 + \pi + \arctg \frac{R_{12}^\tau}{R_{12}^n}, \text{ якщо } \gamma_{12}^n = \varphi_2 - \pi, \quad (1.14)$$

$$\gamma_{43} = \varphi_3 + \arctg \frac{R_{43}^\tau}{R_{43}^n}, \text{ якщо } \gamma_{43}^n = \varphi_3, \quad (1.15)$$

$$\gamma_{43} = \varphi_3 + \pi + \arctg \frac{R_{43}^\tau}{R_{43}^n}, \text{ якщо } \gamma_{43}^n = \varphi_3 - \pi. \quad (1.16)$$

Реакцію  $\overline{\mathbf{R}}_{23}$  знайдемо із умови рівноваги третьої ланки:

$$\overline{\mathbf{R}}_{43} + \overline{\mathbf{F}}_3 + \overline{\mathbf{R}}_{23} = \mathbf{0}. \quad (1.17)$$

У проєкціях на осі координат

$$(\mathbf{R}_{23})_x = -(\mathbf{R}_{43} \cos \gamma_{43} + \mathbf{F}_3 \cos \gamma_3), \quad (1.18)$$

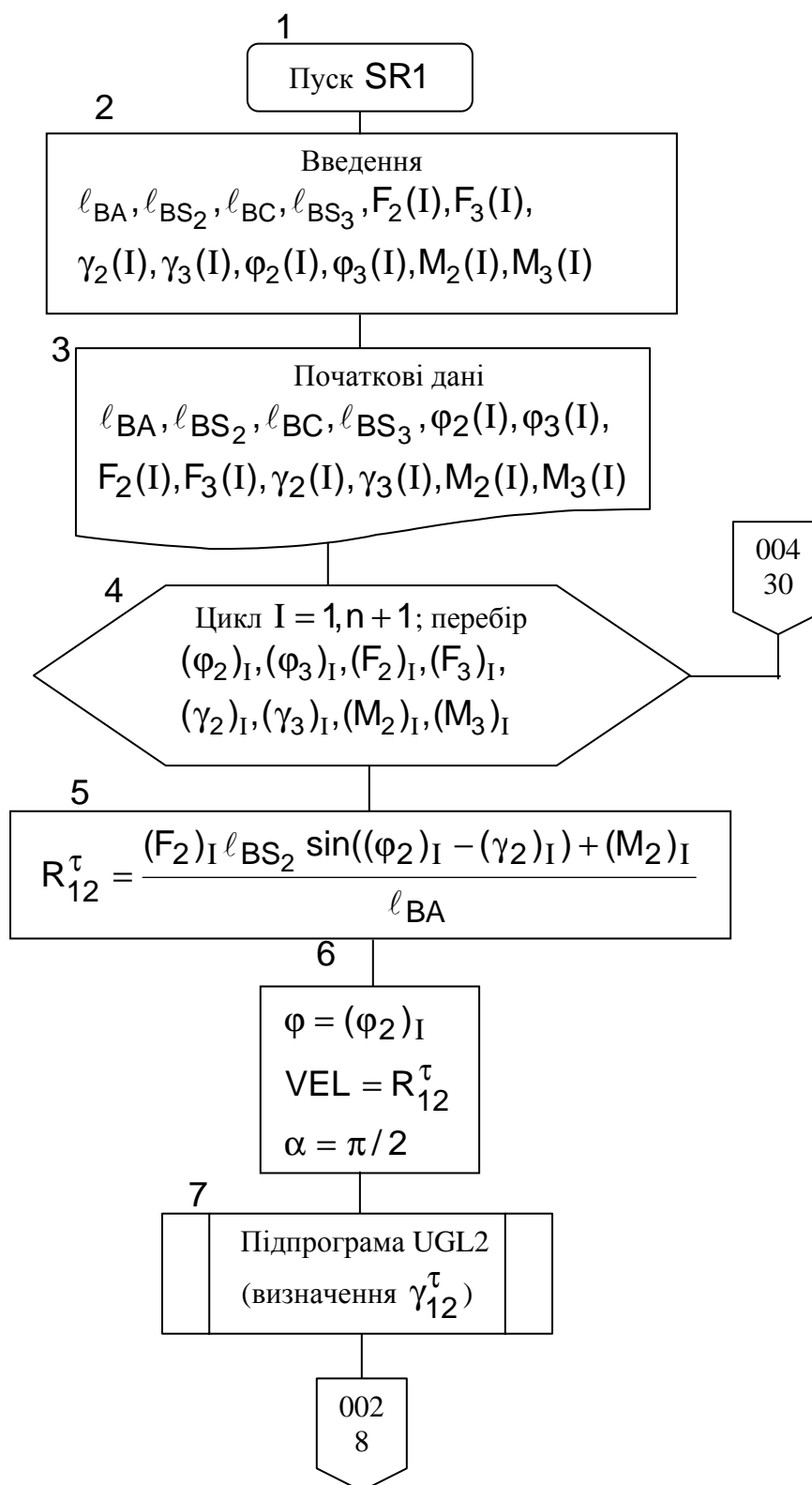
$$(\mathbf{R}_{23})_y = -(\mathbf{R}_{43} \sin \gamma_{43} + \mathbf{F}_3 \sin \gamma_3). \quad (1.19)$$

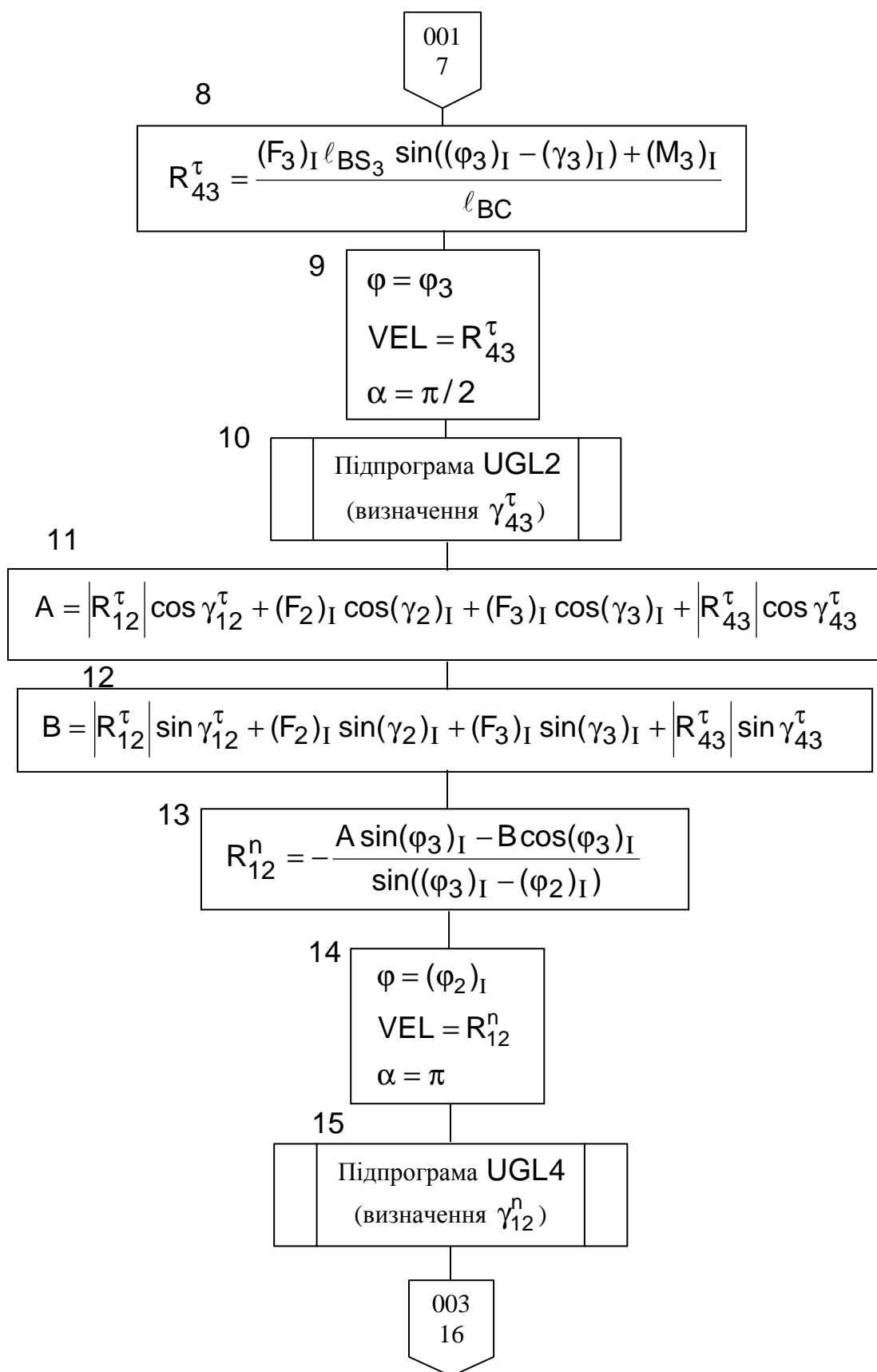
Тоді

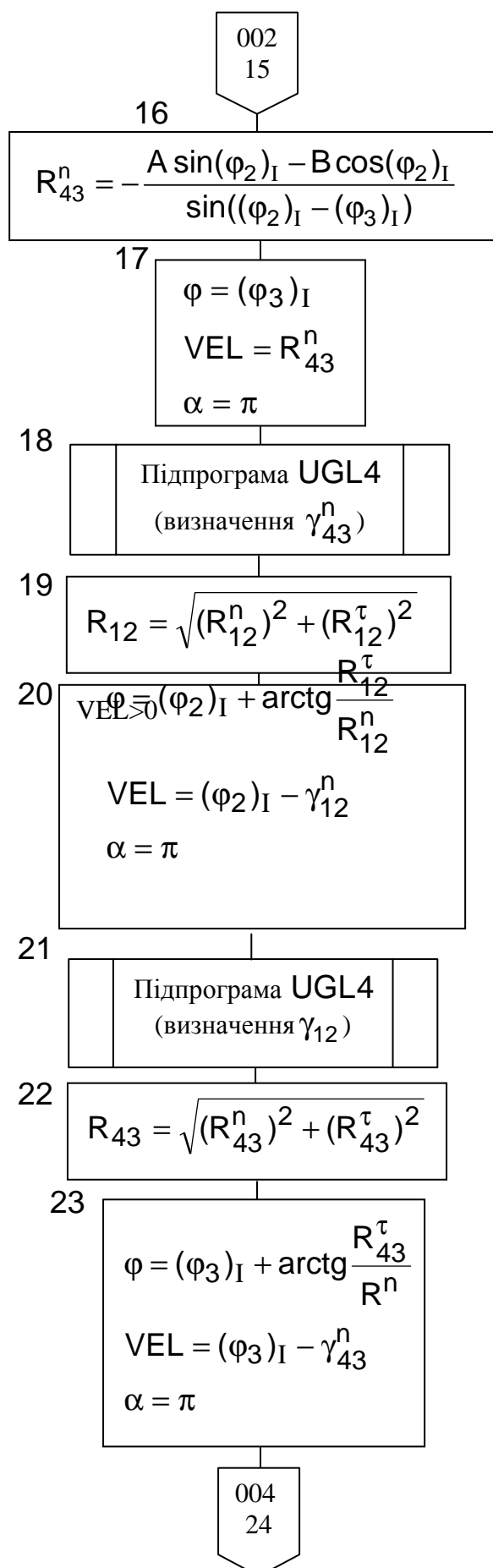
$$\mathbf{R}_{23} = \sqrt{(\mathbf{R}_{23})_x^2 + (\mathbf{R}_{23})_y^2}, \quad (1.20)$$

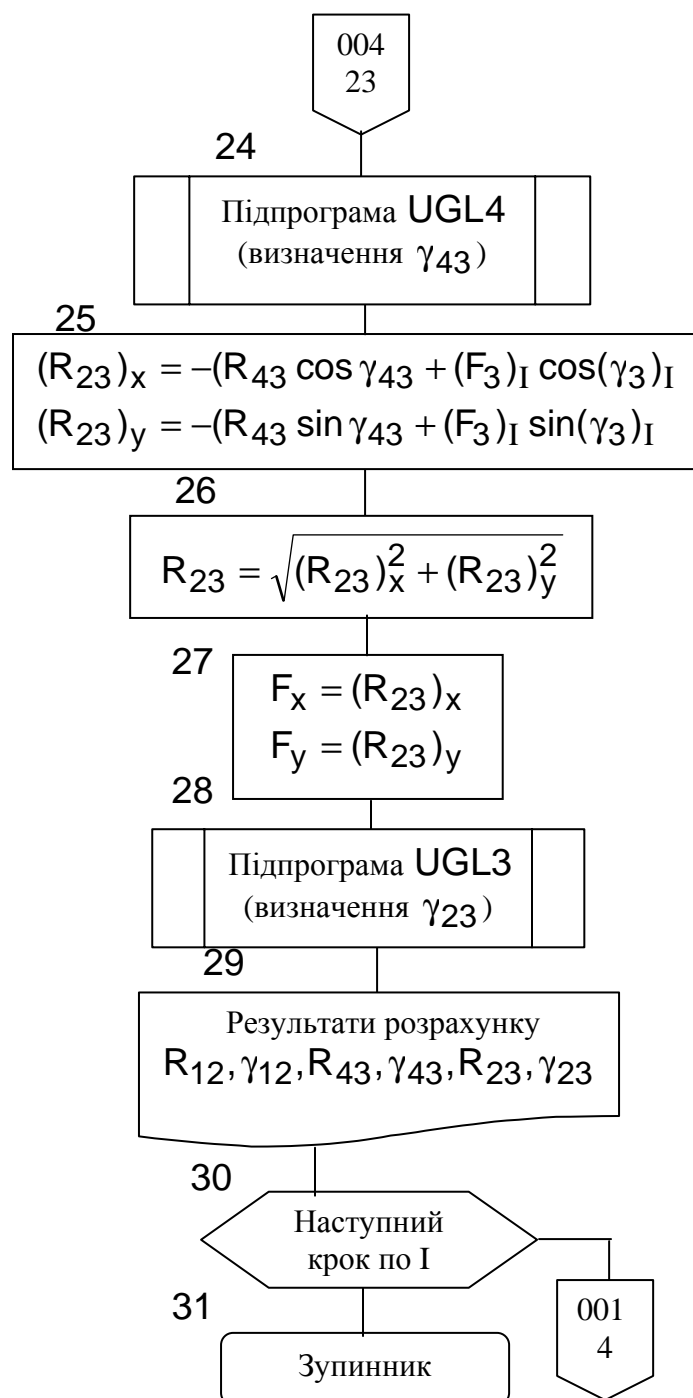
$$\gamma_{23} = \begin{cases} \arctg \left[ (\mathbf{R}_{23})_y / (\mathbf{R}_{23})_x, \text{ якщо } (\mathbf{R}_{23})_x \geq 0, \right. \\ \left. \pi + \arctg \left[ (\mathbf{R}_{23})_y / (\mathbf{R}_{23})_x, \text{ якщо } (\mathbf{R}_{23})_x < 0. \right. \right. \end{cases} \quad (1.21)$$

Схема алгоритму програми SR1 визначення реакцій в кінематичних парах структурної групи другого класу першого виду









Позначення, застосовані у схемі алгоритму програми SR1:

$\ell_{BA}$  - довжина ланки  $AB$ ;

$\ell_{BS_2}$  - розмір, що визначає положення точки  $S_2$  на ланці  $AB$ ;

$\ell_{BC}$  - довжина ланки  $BC$ ;

$\ell_{BS_3}$  - розмір, що визначає положення точки  $S_3$  на ланці  $BC$ ;

$F_2(I)$  - масив значень сили  $\overline{F}_2$ ;

$F_3(I)$  - масив значень сили  $\overline{F}_3$ ;

$\gamma_2(I)$  - масив значень напрямного кута вектора  $\overline{F}_2$ ;

$\gamma_3(I)$  - масив значень напрямного кута вектора  $\overline{F}_3$ ;

$\varphi_2(I)$  - масив значень напрямного кута вектора  $\overline{AB}$ ;

$\varphi_3(I)$  - масив значень напрямного кута вектора  $\overline{CB}$ ;

$(\varphi_2)_I$  - елемент масиву  $\varphi_2(I)$ ;

$(\varphi_3)_I$  - елемент масиву  $\varphi_3(I)$ ;

$(F_2)_I$  - елемент масиву  $F_2(I)$ ;

$(F_3)_I$  - елемент масиву  $F_3(I)$ ;

$(\gamma_2)_I$  - елемент масиву  $\gamma_2(I)$ ;

$(\gamma_3)_I$  - елемент масиву  $\gamma_3(I)$ ;

$M_2(I)$  - масив алгебричних величин моменту  $\overline{M}_2$ ;

$M_3(I)$  - масив алгебричних величин моменту  $\overline{M}_3$ ;

$(M_2)_I$  - елемент масиву  $M_2(I)$ ;

$(M_3)_I$  - елемент масиву  $M_3(I)$ ;

$R_{I2}^{\tau}$  - алгебрична величина тангенціальної складової реакції першої ланки на другу у шарнірі  $A$ ;

$R_{I2}^n$  - алгебрична величина нормальної складової реакції першої ланки на другу у шарнірі  $A$ ;

$R_{43}^{\tau}$  - алгебрична величина тангенціальної складової реакції четвертої ланки на третю у шарнірі  $C$  ;

$R_{43}^n$  - алгебрична величина нормальної складової реакції четвертої ланки на третю у шарнірі  $C$  ;

$\gamma_{12}^{\tau}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{12}^{\tau}$  ;

$\gamma_{12}^n$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{12}^n$  ;

$\gamma_{43}^{\tau}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{43}^{\tau}$  ;

$\gamma_{43}^n$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{43}^n$  ;

$R_{12}$  - значення повної реакції першої ланки на другу у шарнірі  $A$  ;

$\gamma_{12}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{12}$  ;

$R_{43}$  - значення повної реакції четвертої ланки на третю у шарнірі  $C$  ;

$\gamma_{43}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{43}$  ;

$R_{23}$  - значення повної реакції другої ланки на третю у шарнірі  $B$  ;

$\gamma_{23}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{23}$  .

### 1.3.2. Структурна група другого класу другого виду (рис. 1.3)

Дано :  $l_{BA}$  - довжина ланки 2;  $l_{BS_2}$  - розмір, що визначає положення центру мас  $S_2$  на ланці 2;  $\varphi_2$  - напрямний кут вектора  $\overline{AB}$  ;  $\varphi_4$  - кут, що визначає положення осі поступальної пари відносно осі  $Ox$  ;  $F_2, F_3$  - значення головних векторів зовнішніх сил, що включають головні вектори сил інерції;  $\gamma_2, \gamma_3$  - напрямні кути головних векторів  $\overline{F}_2$  та  $\overline{F}_3$  ;  $M_2$  - алгебрична величина головного моменту зовнішніх сил другої ланки, що включає головний момент сил інерції.



За додатні приймаються кути  $\varphi_i$ ,  $\gamma_i$ , напрямки яких відраховуються від напрямку осі OX ( рис.1.3 ) проти ходу годинникової стрілки.

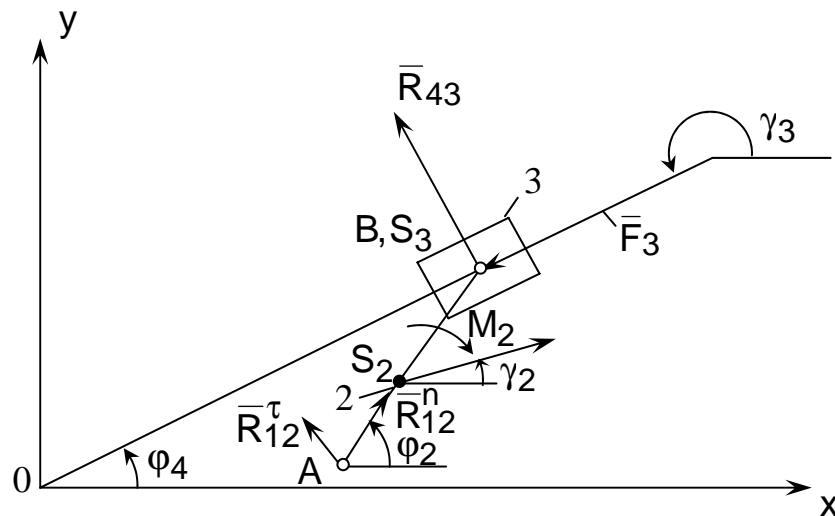


Рис. 1.3

Необхідно визначити реакції в кінематичних парах структурної групи  $\bar{R}_{12}, \bar{R}_{23}, = -\bar{R}_{32}, \bar{R}_{43}$ . В шарнірі А реакцію розкладають на дві взаємно перпендикулярні складові  $\bar{R}_{12} = \bar{R}_{12}^n + \bar{R}_{12}^\tau$ . Попередній напрямок реакції  $\bar{R}_{12}^n$  приймаємо таким, щоб кут  $\gamma_{12}^n$  збігався з кутом  $\varphi_2$ .

Попередній напрямок вектора  $\bar{R}_{12}^\tau$  одержують поворотом  $\bar{R}_{12}^n$  на кут  $0,5\pi$  проти ходу годинникової стрілки ( $\gamma_{12}^\tau = \varphi_2 + 0,5\pi$ ).

Напрямок реакції  $\bar{R}_{43}$  приймемо таким, щоб  $\gamma_{43} = \varphi_4 + 0,5\pi$ .

Величину реакції  $\bar{R}_{12}^\tau$  визначимо з умови рівноваги другої ланки у формі рівняння моментів:

$$\Sigma \bar{M}_{B_2} = \bar{l}_{BA} \times \bar{R}_{12}^\tau + \bar{l}_{BS_2} \times \bar{F}_2 + \bar{M}_2 = 0, \quad (1.22)$$

або

$$\bar{k} \left| \begin{array}{l} \bar{l}_{BA} \cos(\varphi_2 + \pi) \bar{l}_{BA} \sin(\varphi_2 + \pi) \\ \bar{R}_{12}^\tau \cos(\varphi_2 + 0,5\pi) \bar{R}_{12}^\tau \sin(\varphi_2 + 0,5\pi) \end{array} \right| +$$

$$+k \left| \begin{array}{l} \ell_{BS_2} \cos(\varphi_2 + \pi) \ell_{BS_2} \sin(\varphi_2 + \pi) \\ F_2 \cos \gamma_2 \quad F_2 \sin \gamma_2 \end{array} \right| + \overline{M}_2 = 0, \quad (1.23)$$

звідки

$$R_{I2}^\tau = \frac{F_2 \ell_{BS_2} \sin(\varphi_2 - \gamma_2) + M_2}{\ell_{BA}}, \quad (1.24)$$

де  $M_2$  - алгебрична величина.

Якщо чисельне значення правої частини виразу (1.24) одержується зі знаком мінус, то  $\gamma_{I2}^\tau = \varphi_2 - 0,5\pi$ .

Для визначення величин реакцій  $\overline{R}_{I2}^n$  та  $\overline{R}_{43}$  запишемо векторне рівняння рівноваги структурної групи:

$$\overline{R}_{I2}^n + \overline{R}_{I2}^\tau + \overline{F}_2 + \overline{F}_3 + \overline{R}_{43} = 0, \quad (1.25)$$

Спроектувавши вектори сил на координатні осі, одержимо

$$R_{I2}^n \cos \varphi_2 + \left| R_{I2}^\tau \right| \cos \gamma_{I2}^\tau + F_2 \cos \gamma_2 + F_3 \cos \gamma_3 + \\ + R_{43} \cos(\varphi_4 + 0,5\pi) = 0;$$

$$R_{I2}^n \sin \varphi_2 + \left| R_{I2}^\tau \right| \sin \gamma_{I2}^\tau + F_2 \sin \gamma_2 + F_3 \sin \gamma_3 + \\ + R_{43} \sin(\varphi_4 + 0,5\pi) = 0,$$

або

$$R_{I2}^n \cos \varphi_2 - R_{43} \sin \varphi_4 = \\ = - \left( \left| R_{I2}^\tau \right| \cos \gamma_{I2}^\tau + F_2 \cos \gamma_2 + F_3 \cos \gamma_3 \right), \quad (1.26)$$

$$\begin{aligned}
& R_{12}^n \sin \varphi_2 + R_{43} \cos \varphi_4 = \\
& = - \left( \left| R_{12}^\tau \right| \sin \gamma_{12}^\tau + F_2 \sin \gamma_2 + F_3 \sin \gamma_3 \right).
\end{aligned}$$

Позначивши праві частини рівнянь (1.26) відповідно  $(-A)$  та  $(-B)$ , маємо

$$R_{12}^n \cos \varphi_2 - R_{43} \sin \varphi_4 = -A,$$

$$R_{12}^n \sin \varphi_2 - R_{43} \cos \varphi_4 = -B.$$

Розв'язавши систему рівнянь (1.26), визначимо величини реакцій  $\overline{R}_{12}^n$  та  $\overline{R}_{43}$ :

$$R_{12}^n = - \frac{A \cos \varphi_4 + B \sin \varphi_4}{\cos(\varphi_2 - \varphi_4)},$$

$$R_{43} = \frac{A \sin \varphi_2 - B \cos \varphi_2}{\cos(\varphi_2 - \varphi_4)}.$$

Якщо  $R_{12}^n < 0$ , то  $\gamma_{12}^n = \varphi_2 + \pi$ , якщо  $R_{43} < 0$ , то  $\gamma_{43} = \varphi_4 - 0,5\pi$ .

Знайдемо значення та напрямний кут реакції  $\overline{R}_{12}$ :

$$R_{12} = \sqrt{(R_{12}^n)^2 + (R_{12}^\tau)^2}; \quad (1.27)$$

$$\gamma_{12} = \varphi_2 + \arctg \frac{R_{12}^\tau}{R_{12}^n}, \text{ якщо } \gamma_{12}^n = \varphi_2;$$

$$\gamma_{12} = \varphi_2 + \pi + \operatorname{arctg} \frac{R_{12}^r}{R_{12}^n}, \text{ якщо } \gamma_{12}^n = \varphi_2 + \pi. \quad (1.28)$$

Лінія дії реакції  $\overline{R}_{43}$  проходить через центр шарніра  $B$ , тобто плече  $h_{43}$  реакції  $\overline{R}_{43}$  відносно точки  $B$  дорівнює нулю.

Величину реакції  $\overline{R}_{23}$  визначимо з розгляду рівноваги третьої ланки:

$$\overline{R}_{43} + \overline{F}_3 + \overline{R}_{23} = 0, \quad (1.29)$$

звідки

$$(\overline{R}_{23})_x = -(\overline{R}_{43} \cos \gamma_{43} + \overline{F}_3 \cos \gamma_3), \quad (1.30)$$

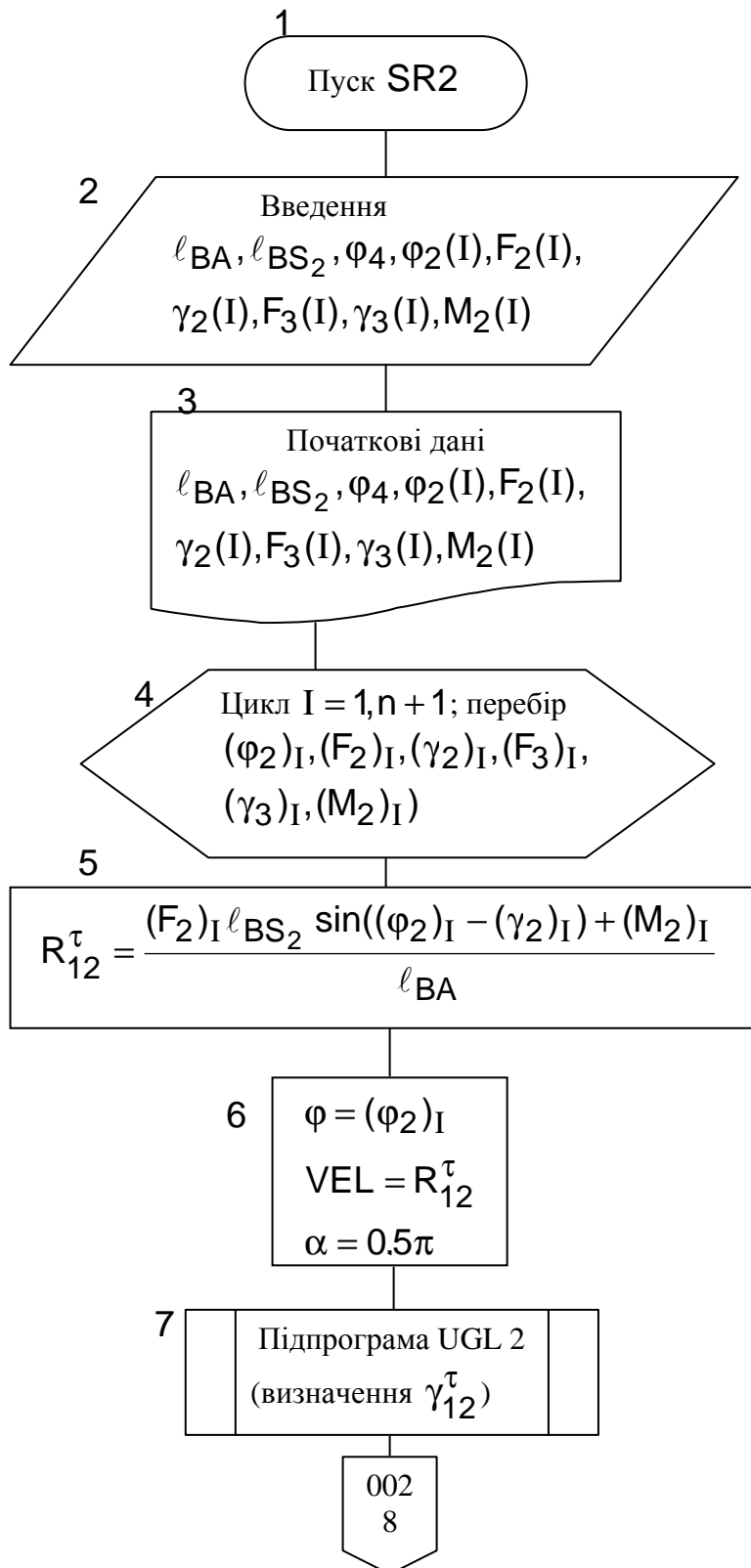
$$(\overline{R}_{23})_y = -(\overline{R}_{43} \sin \gamma_{43} + \overline{F}_3 \sin \gamma_3).$$

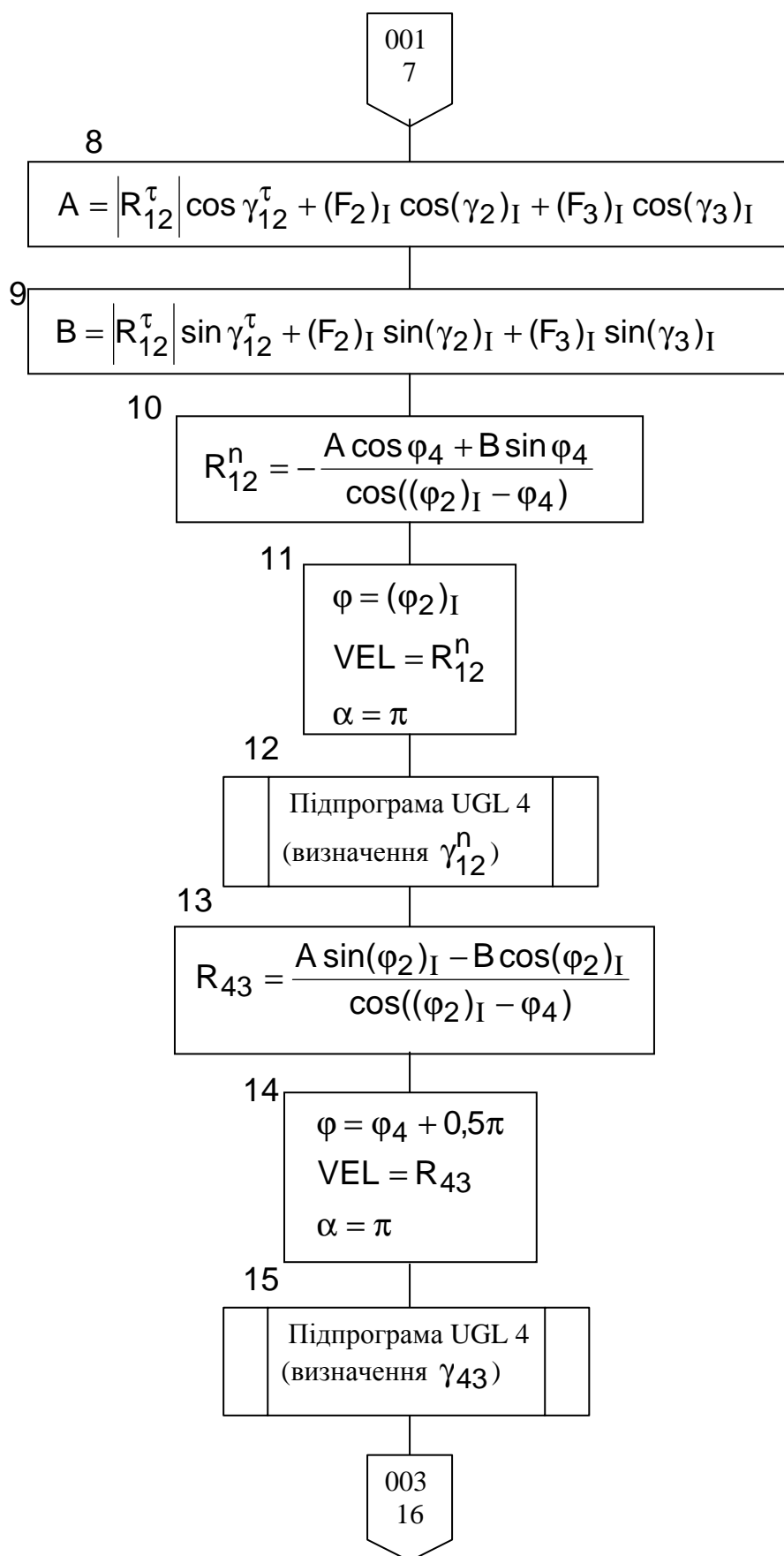
Знайдемо значення та напрямний кут реакції  $\overline{R}_{23}$ :

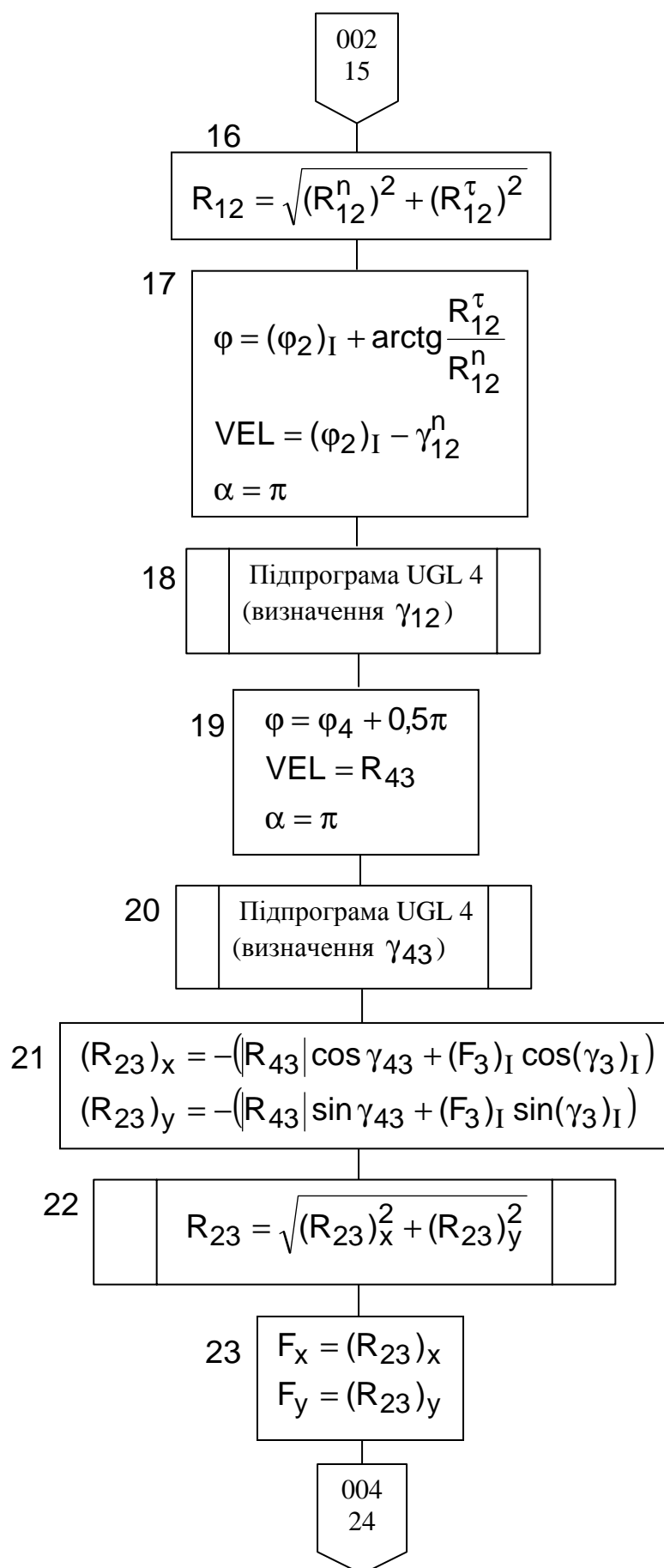
$$\overline{R}_{23} = \sqrt{(\overline{R}_{23})_x^2 + (\overline{R}_{23})_y^2}; \quad (1.31)$$

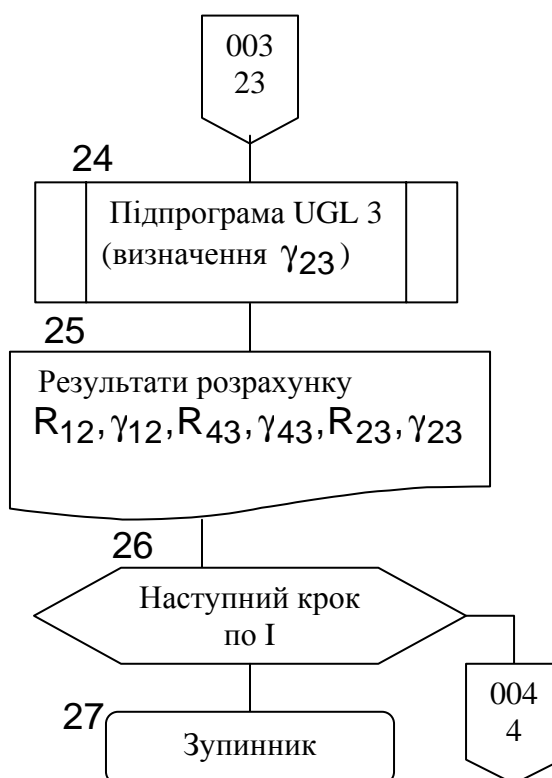
$$\gamma_{23} = \begin{cases} \operatorname{arctg}((\overline{R}_{23})_y / (\overline{R}_{23})_x), \text{ якщо } (\overline{R}_{23})_x \geq 0, \\ \pi + \operatorname{arctg}((\overline{R}_{23})_y / (\overline{R}_{23})_x), \text{ якщо } (\overline{R}_{23})_x < 0. \end{cases} \quad (1.32)$$

Схема  
алгоритму програми SR2 визначення реакцій в кінематичних  
парах структурної групи другого класу другого виду









Позначення, застосовані у схемі алгоритму програми SR2:

$l_{BA}$  - довжина ланки  $BA$ ;

$l_{BS_2}$  - розмір, що визначає положення точки  $S_2$  на ланці  $BA$ ;

$\varphi_4$  - кут нахилу осі поступальної пари;

$F_2(I)$  - масив значень сили  $\overline{F}_2$ ;

$\gamma_2(I)$  - масив значень напрямних кутів сили  $\overline{F}_2$ ;

$F_3(I)$  - масив значень сили  $\overline{F}_3$ ;

$\gamma_3(I)$  - масив значень напрямних кутів сили  $\overline{F}_3$ ;

$M_2(I)$  - масив алгебричних величин моменту  $\overline{M}_2$ ;

$(F_2)_I$  - елемент масиву  $F_2(I)$ ;

$(\gamma_2)_I$  - елемент масиву  $\gamma_2(I)$ ;

$(F_3)_I$  - елемент масиву  $F_3(I)$ ;



$(\gamma_3)_I$  - елемент масиву  $\gamma_3(I)$ ;

$(M_2)_I$  - елемент масиву  $M_2(I)$ ;

$R_{12}^{\tau}$  - алгебрична величина тангенціальної складової реакції першої ланки на другу у шарнірі  $A$ ;

$R_{12}^n$  - алгебрична величина нормальної складової реакції першої ланки на другу у шарнірі  $A$ ;

$R_{43}$  - алгебрична величина реакції четвертої ланки на третю в поступальній парі  $B$ ;

$\gamma_{43}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{43}$ ;

$R_{12}$  - значення повної реакції першої ланки на другу у шарнірі  $A$ ;

$\gamma_{12}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{12}$ ;

$R_{23}$  - значення повної реакції другої ланки на третю у шарнірі  $B$ ;

$\gamma_{23}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{23}$ .

### 1.3.3. Структурна група другого класу третього виду (рис. 1.4)

Дано:  $l_{AB}, l_{EC}$  - довжини ланок;  $l_{AS_2}, l_{ES_3}$  - розміри, що визначають положення центрів мас  $S_2$  та  $S_3$  на ланках групи;  $l_{BC}$  - хід поршня;  $\varphi_2$  - кут, що визначає положення осі поступальної пари відносно осі  $OX$ ;  $F_2, F_3$  - значення головних векторів зовнішніх сил, що включають головні вектори сил інерції;  $\gamma_2, \gamma_3$  - напрямні кути головних векторів  $\overline{F}_2$  та  $\overline{F}_3$ ;  $M_2, M_3$  - алгебричні величини головних моментів зовнішніх сил, що включають головні моменти сил інерції.

За додатні приймаються кути  $\varphi_i$ ,  $\gamma_i$ , напрямки яких відраховуються від напрямку осі  $OX$  проти ходу годинникової стрілки.

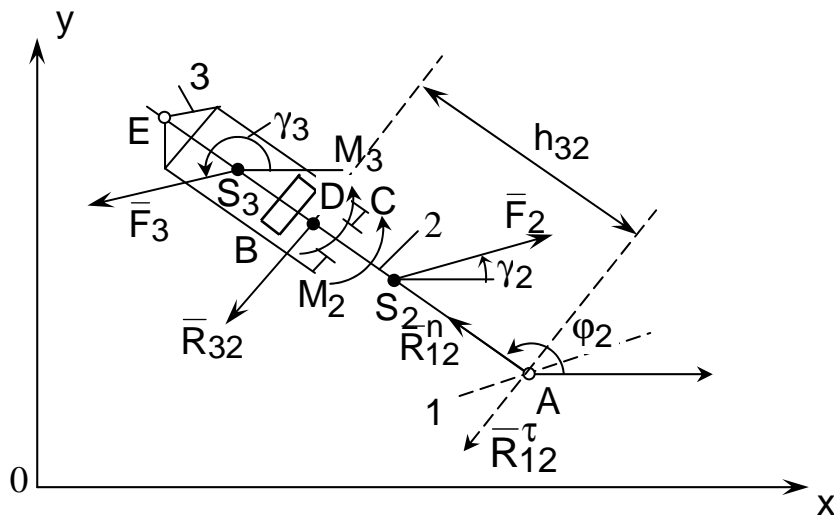


Рис. 1.4

Необхідно визначити реакції в кінематичних парах структурної групи  $\overline{R}_{12}, \overline{R}_{23}, = -\overline{R}_{32}, \overline{R}_{43}$ .  $h_{32}$  - плече реакції  $\overline{R}_{32}$ . В шарнірі  $A$  реакцію розкладемо на дві взаємно перпендикулярні складові  $\overline{R}_{12} = \overline{R}_{12}^n + \overline{R}_{12}^\tau$ .

Попередній напрямок реакції  $\overline{R}_{12}^n$  приймаємо таким, щоб її напрямний кут  $\gamma_{12}^n$  збігався з кутом  $\varphi_2$ .

Попередній напрямок реакції  $\overline{R}_{12}^\tau$  одержують поворотом  $\overline{R}_{12}^n$  на кут  $0,5\pi$  проти ходу годинникової стрілки.

Напрямок реакції  $\overline{R}_{32}$  прийемо таким, щоб  $\gamma_{32} = \varphi_2 + 0,5\pi$ .

Величину реакції  $\overline{R}_{12}^\tau$  визначимо з умови рівноваги структурної групи у формі рівняння моментів:

$$\begin{aligned} \overline{\Sigma M}_E = \overline{l}_{EA} \times \overline{R}_{12}^\tau + \overline{l}_{ES_2} \times \overline{F}_2 + \\ + \overline{l}_{ES_3} \times \overline{F}_3 + \overline{M}_2 + \overline{M}_3 = 0. \end{aligned} \quad (1.33)$$

де  $\overline{l}_{EA} = (\overline{l}_{AB} - \overline{l}_{BC}) + \overline{l}_{EC}$ ;  $\overline{l}_{ES_2} = \overline{l}_{EA} - \overline{l}_{AS_2}$ ,

або

$$\overline{k} \left| \begin{array}{l} \overline{l}_{EA} \cos(\varphi_2 + \pi) \overline{l}_{EA} \sin(\varphi_2 + \pi) \\ \overline{R}_{12}^\tau \cos(\varphi_2 + 0,5\pi) \overline{R}_{12}^\tau \sin(\varphi_2 + 0,5) \end{array} \right| +$$

$$\begin{aligned}
& + \overline{k} \left| \begin{array}{cc} \ell_{ES_2} \cos(\varphi_2 + \pi) & \ell_{ES_2} \sin(\varphi_2 + \pi) \\ F_2 \cos \gamma_2 & F_2 \sin \gamma_2 \end{array} \right| + \\
& + \overline{k} \left| \begin{array}{cc} \ell_{ES_3} \cos(\varphi_2 + \pi) & \ell_{ES_3} \sin(\varphi_2 + \pi) \\ F_3 \cos \gamma_3 & F_3 \sin \gamma_3 \end{array} \right| + \\
& \quad \quad \quad + \overline{M}_2 + \overline{M}_3 = 0,
\end{aligned} \tag{1.34}$$

звідки

$$\begin{aligned}
R_{12}^\tau = \frac{F_2 \ell_{ES_2} \sin(\varphi_2 - \gamma_2) + F_3 \ell_{ES_3} \sin(\varphi_2 - \gamma_2)}{\ell_{EA}} + \\
+ \frac{M_2 + M_3}{\ell_{EA}}.
\end{aligned} \tag{1.35}$$

Якщо чисельне значення правої частини виразу (1.35) одержується зі знаком мінус, то  $\gamma_{12}^\tau = \varphi_2 - 0,5\pi$ .

Для визначення величин реакцій  $\overline{R}_{12}^n$  та  $\overline{R}_{32}$  запишемо векторне рівняння рівноваги другої ланки:

$$\overline{R}_{12}^n + \overline{R}_{12}^\tau + \overline{F}_2 + \overline{R}_{32} = 0. \tag{1.36}$$

Проектуючи вектори сил на координатні осі, дістанемо

$$R_{12}^n \cos \varphi_2 + R_{12}^\tau \cos \gamma_{12}^\tau + F_2 \cos \gamma_2 + R_{32} \cos(\varphi_2 + 0,5\pi) = 0;$$

$$R_{12}^n \sin \varphi_2 + R_{12}^\tau \sin \gamma_{12}^\tau + F_2 \sin \gamma_2 + R_{32} \sin(\varphi_2 + 0,5\pi) = 0,$$

або

$$R_{12}^n \cos \varphi_2 - R_{32} \sin \varphi_2 = -(R_{12}^\tau \cos \gamma_{12}^\tau + F_2 \cos \gamma_2); \tag{1.37}$$

$$R_{12}^n \sin \varphi_2 + R_{32} \cos \varphi_2 = -(R_{12}^\tau \sin \gamma_{12}^\tau + F_2 \sin \gamma_2).$$

Позначивши праві частини рівнянь (1.10) відповідно  $(-A)$  та  $(-B)$ , маємо

$$\begin{aligned} R_{12}^n \cos \varphi_2 - R_{43} \sin \varphi_2 &= -A, \\ R_{12}^n \sin \varphi_2 + R_{32} \cos \varphi_2 &= -B. \end{aligned}$$

Розв'язуючи систему рівнянь (1.37), знайдемо величини реакцій  $\overline{R}_{12}^n$  та  $\overline{R}_{32}$ :

$$\begin{aligned} R_{12}^n &= -(A \cos \varphi_2 + B \sin \varphi_2), \\ R_{32} &= A \sin \varphi_2 - B \cos \varphi_2. \end{aligned}$$

Якщо  $R_{12}^n < 0$ , то  $\gamma_{12}^n = \varphi_2 - \pi$ , якщо  $R_{32} < 0$ , то  $\gamma_{32} = \varphi_2 - 0,5\pi$ .

Значення реакції  $\overline{R}_{12}$  дорівнює

$$R_{12} = \sqrt{(R_{12}^n)^2 + (R_{12}^\tau)^2}. \quad (1.38)$$

Напрячний кут реакції  $\overline{R}_{12}$

$$\gamma_{12} = \varphi_2 + \operatorname{arctg} \frac{R_{12}^\tau}{R_{12}^n}, \text{ якщо } \gamma_{12}^n = \varphi_2,$$

$$\text{або } \gamma_{12} = \varphi_2 + \pi + \operatorname{arctg} \frac{R_{12}^\tau}{R_{12}^n}, \text{ якщо } \gamma_{12}^n = \varphi_2 - \pi. \quad (1.39)$$

Для визначення величини реакції  $\overline{R}_{43}$  запишемо векторне рівняння рівноваги третьої ланки:

$$\overline{R}_{23} + \overline{F}_3 + \overline{R}_{43} = 0. \quad (1.40)$$

Проектуючи вектори сил на координатні осі, маємо

$$\begin{aligned} (R_{43})_x &= -(R_{23} \cos \gamma_{23} + F_3 \cos \gamma_3), \\ (R_{43})_y &= -(R_{23} \sin \gamma_{23} + F_3 \sin \gamma_3), \end{aligned} \quad (1.41)$$

де  $\gamma_{23} = \gamma_{32} + \pi$ ;  $R_{23} = |R_{32}|$ .

Тоді значення реакції  $\bar{R}_{43}$

$$R_{43} = \sqrt{(R_{43})_x^2 + (R_{43})_y^2}, \quad (1.42)$$

а напрямний кут вектора  $\bar{R}_{43}$

$$\gamma_{43} = \begin{cases} \arctg((R_{43})_y / (R_{43})_x), & \text{якщо } (R_{43})_x \geq 0, \\ \pi + \arctg((R_{43})_y / (R_{43})_x), & \text{якщо } (R_{43})_x < 0. \end{cases} \quad (1.43)$$

Плече  $h_{32} = \ell_{AD}$  реакції  $\bar{R}_{32}$  визначимо із рівняння моментів

$$\Sigma M_{A_2} = \bar{\ell}_{AD} \times \bar{R}_{32} + \bar{\ell}_{AS_2} \times \bar{F}_2 + \bar{M}_2 = 0, \quad (1.44)$$

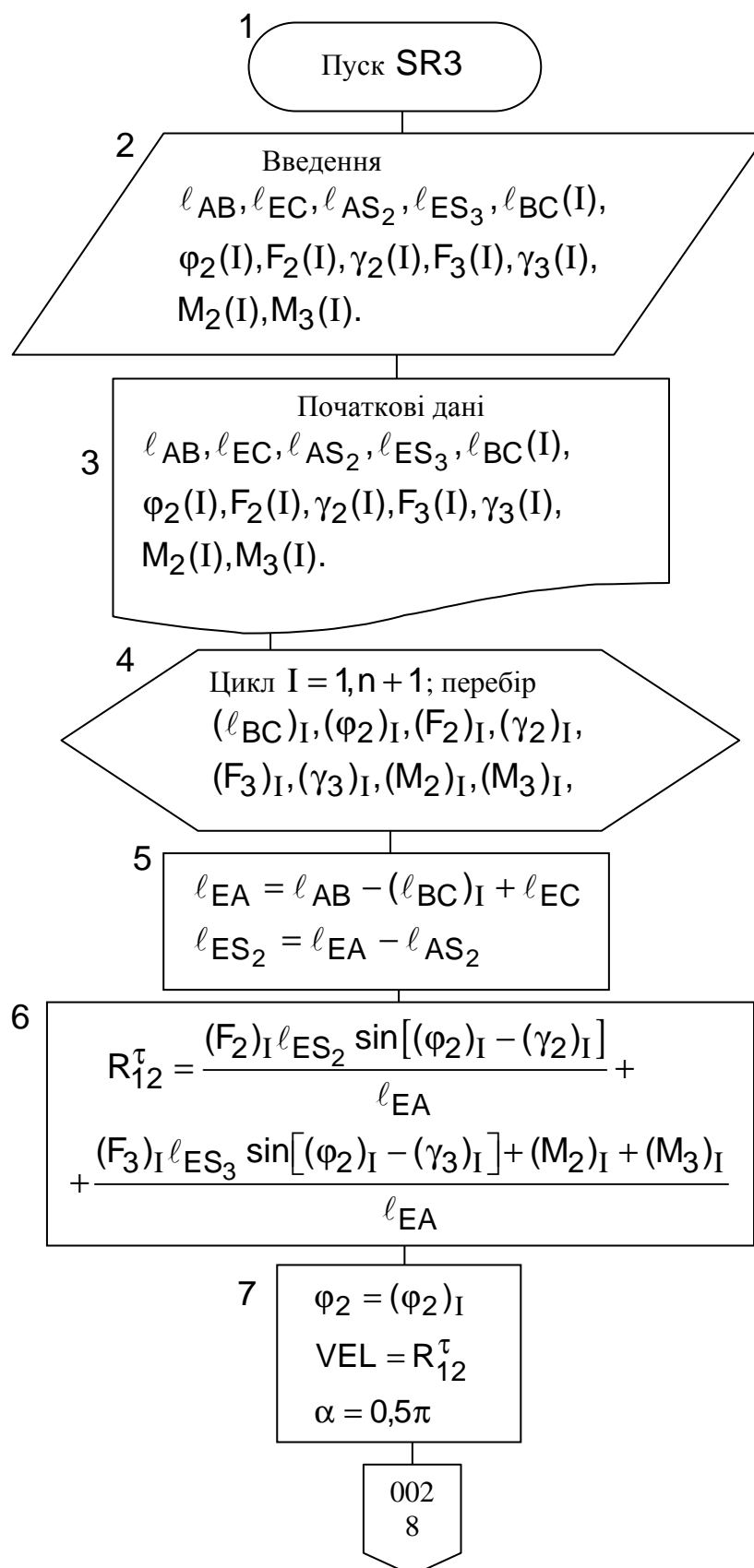
або

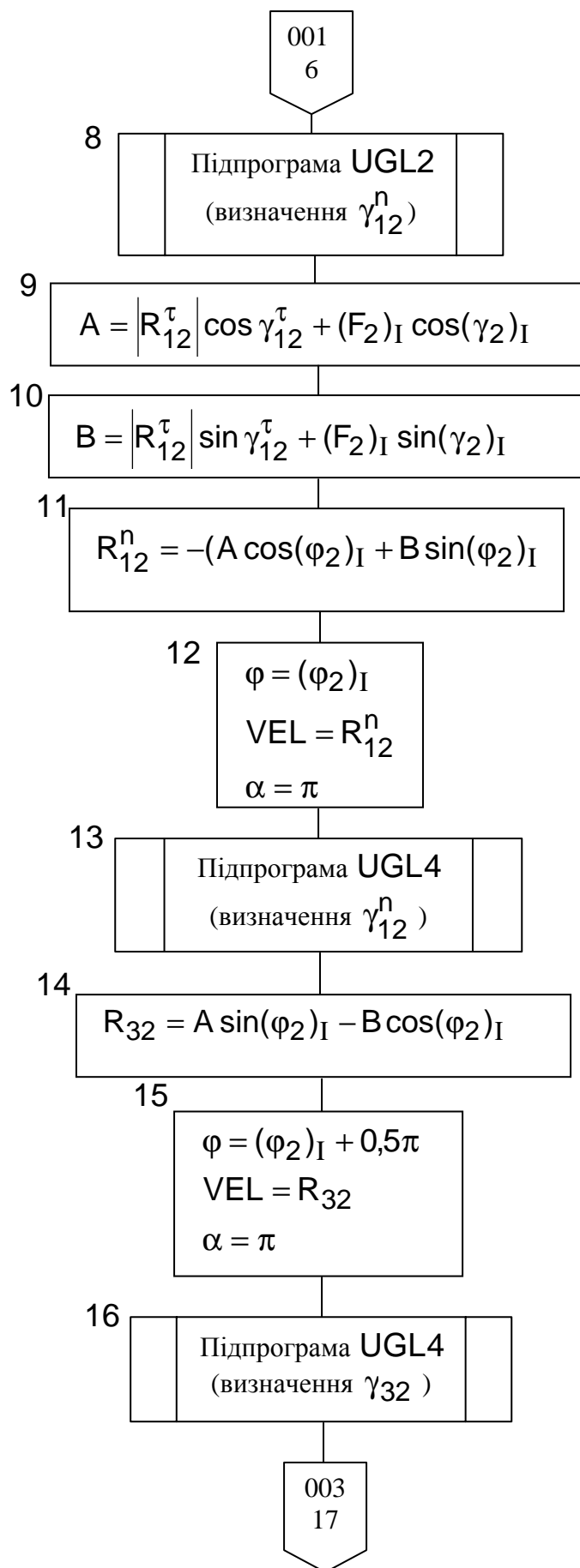
$$\begin{aligned} & \bar{k} \left| \begin{array}{cc} \ell_{AD} \cos \varphi_2 & \ell_{AD} \sin \varphi_2 \\ R_{32} \cos \gamma_{32} & R_{32} \sin \gamma_{32} \end{array} \right| + \\ & + \bar{k} \left| \begin{array}{cc} \ell_{AS_2} \cos \varphi_2 & \ell_{AS_2} \sin \varphi_2 \\ F_2 \cos \gamma_2 & F_2 \sin \gamma_2 \end{array} \right| + \bar{M}_2 = 0, \end{aligned} \quad (1.45)$$

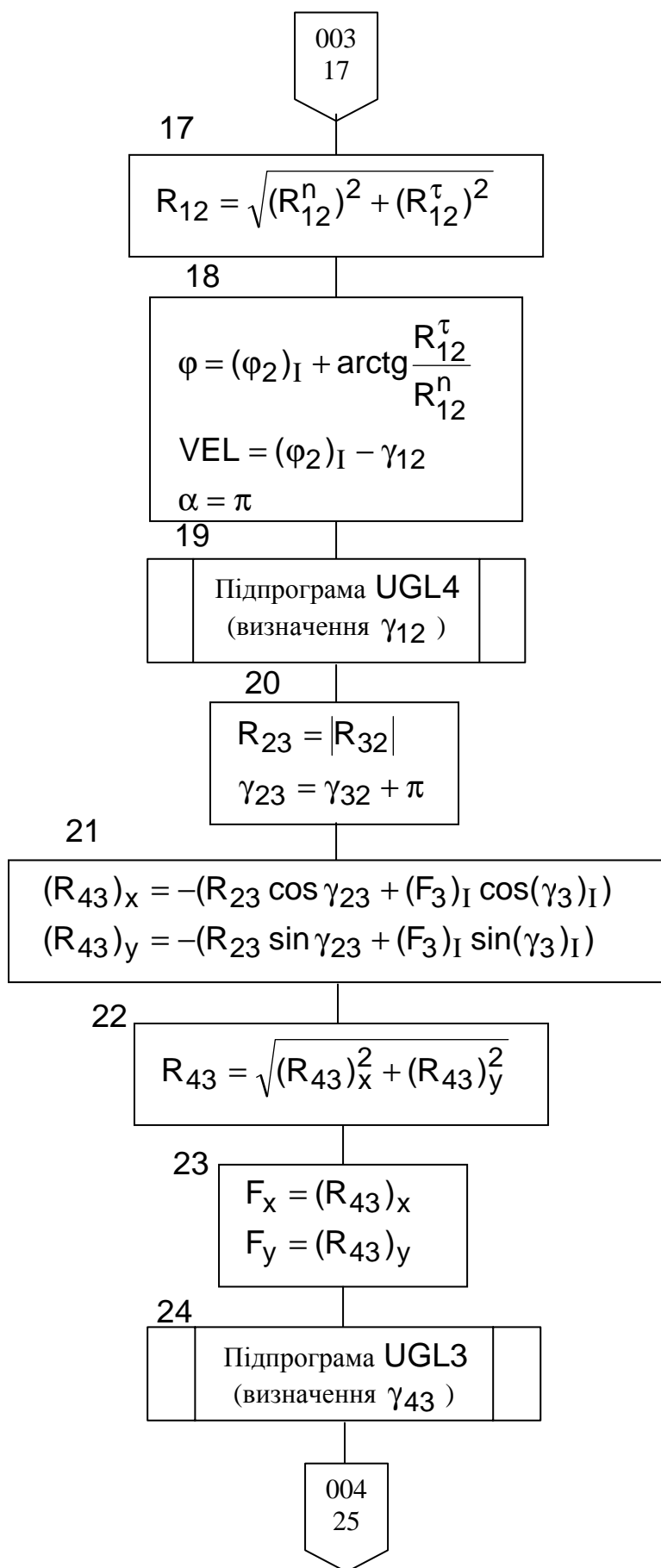
звідки

$$h_{32} = - \frac{F_2 \ell_{AS_2} \sin(\gamma_2 - \varphi_2) + M_2}{|R_{32}| \sin(\gamma_{32} - \varphi_2)}, \quad (1.46)$$

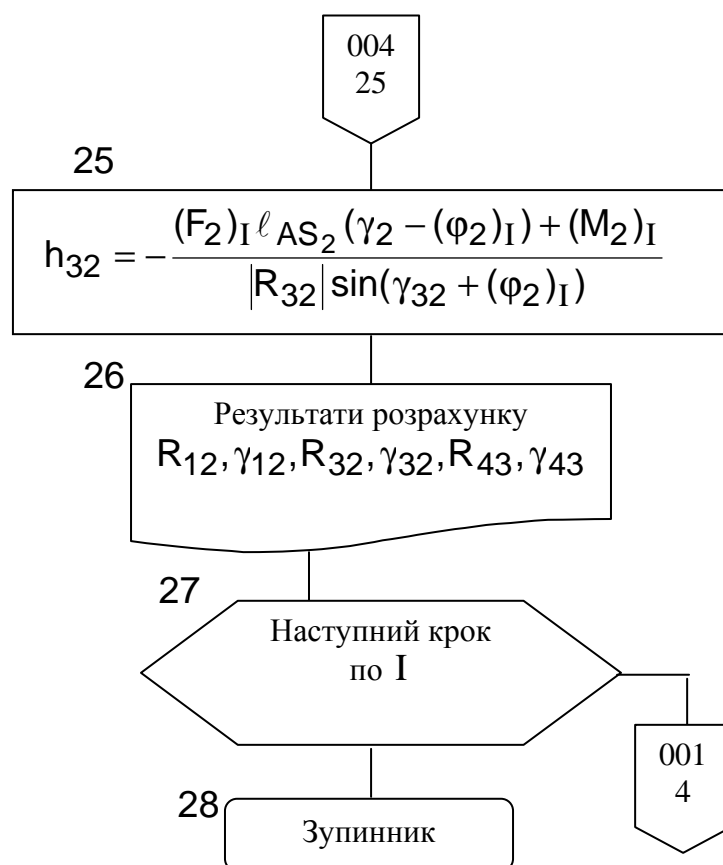
Схема алгоритму програми SR3 визначення реакцій в кінематичних парах структурної групи другого класу третього виду











Позначення, застосовані у схемі алгоритму програми SR3:

$\ell_{AB}$  - довжина штока з поршнем;

$\ell_{EC}$  - довжина циліндра;

$\ell_{AS_2}$  - розмір, що визначає положення точки  $S_2$  на ланці 2;

$\ell_{ES_3}$  - розмір, що визначає положення центру мас циліндра;

$\ell_{BC}(I)$  - масив значень ходу поршня;

$\varphi_2(I)$  - масив значень кута  $\varphi_2$ ;

$F_2(I)$  - масив значень головного вектора  $\overline{F}_2$ ;

$F_3(I)$  - масив значень головного вектора  $\overline{F}_3$ ;

$\gamma_2(I)$  - масив значень напрямного кута головного вектора  $\overline{F}_2$ ;

$\gamma_3(I)$  - масив значень напрямного кута головного вектора  $\overline{F}_3$ ;

$M_2(I)$  - масив алгебричних величин головного моменту  $\overline{M}_2$ ;

$M_3(I)$  - масив алгебричних величин головного моменту  $\overline{M}_3$ ;

$(\varphi_2)_I$  - елемент масиву  $\varphi_2(I)$ ;

$(F_2)_I$  - елемент масиву  $F_2(I)$ ;

$(F_3)_I$  - елемент масиву  $F_3(I)$ ;

$(\gamma_2)_I$  - елемент масиву  $\gamma_2(I)$ ;

$(\gamma_3)_I$  - елемент масиву  $\gamma_3(I)$ ;

$(M_2)_I$  - елемент масиву  $M_2(I)$ ;

$(M_3)_I$  - елемент масиву  $M_3(I)$ ;

$R_{12}^{\tau}$  - алгебрична величина тангенціальної складової реакції першої ланки на другу в шарнірі  $A$ ;

$R_{12}^n$  - алгебрична величина нормальної складової реакції першої ланки на другу в шарнірі  $A$ ;

$R_{32}$  - алгебрична величина реакції третьої ланки на другу в поступальній парі структурної групи;

$\gamma_{32}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{32}$ ;

$R_{12}$  - значення повної реакції  $\overline{R}_{12}$ ;

$\gamma_{12}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{12}$ ;

$R_{43}$  - значення повної реакції  $\overline{R}_{43}$ ;

$\gamma_{43}$  - напрямний кут вектора  $\overline{R}_{43}$ ;

$h_{32}$  - плече реакції  $\overline{R}_{32}$ .

**1.4. Силовий розрахунок вхідної ланки механізму**  
**1.4.1. Силовий розрахунок, якщо енергія від двигуна до вхідної ланки робочої машини (виконавчого механізму) передається зубчастою передачею (рис.1.5)**

Дано :  $\ell_{O_1A}$  - довжина вхідної ланки 1;  $\ell_{O_1S_1}$  - розмір, що визначає положення центру мас  $S_1$  на вхідній ланці 1;  $\ell_{O_1P}$  - радіус навчального кола колеса;  $\varphi_1$  - кут, що визначає положення вхідної ланки 1;  $F_1$  - значення головного вектора відомих зовнішніх сил, що включає головний вектор сил інерції;  $\gamma_1$  - напрямний кут вектора  $\bar{F}_1$ ;  $R_{21} = |R_{12}|$  - значення реакції від структурної групи, першої у порядку нашарування;  $\gamma_{21} = \gamma_{12} + \pi$  - напрямний кут вектора  $\bar{R}_{21}$ ;  $M_1$  - алгебрична величина головного моменту відомих зовнішніх сил, що включає головний момент сил інерції.

Попереднє значення напрямного кута невідомої зрівноважувальної сили  $\bar{F}_{3p}$  приймається  $0,5\pi - \alpha_w$ . Необхідно визначити зрівноважувальну силу  $\bar{F}_{3p}$  та реакцію  $\bar{R}_{O_1}$  у шарнірі  $O_1$ .

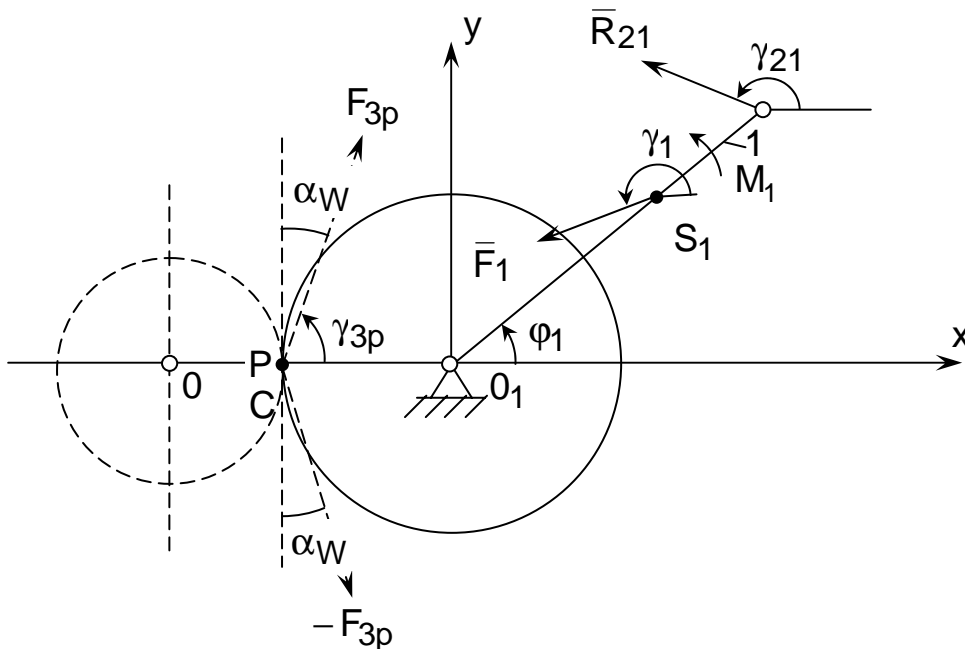


Рис. 1.5

Величину зрівноважувальної сили знайдемо із рівняння моментів:

$$\begin{aligned} \Sigma \bar{\mathbf{M}}_{O1} = \bar{\ell}_{O1P} \times \bar{\mathbf{F}}_{3p} + \\ + \bar{\ell}_{O1S1} \times \bar{\mathbf{F}}_1 + \bar{\ell}_{O1A} \times \bar{\mathbf{R}}_{21} + \bar{\mathbf{M}}_1 = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (1.47)$$

або

$$\begin{aligned} \bar{k} \left| \begin{array}{cc} \ell_{O1P} \cos \pi & \ell_{O1P} \sin \pi \\ F_{3p} \cos \gamma_{3p} & F_{3p} \sin \gamma_{3p} \end{array} \right| + \bar{k} \left| \begin{array}{cc} \ell_{OS1} \cos \varphi_1 & \ell_{OS1} \sin \varphi_1 \\ F_1 \cos \gamma_1 & F_1 \sin \gamma_1 \end{array} \right| + \\ + \bar{k} \left| \begin{array}{cc} \ell_{O1A} \cos \varphi_1 & \ell_{O1A} \sin \varphi_1 \\ R_{21} \cos \gamma_{21} & R_{21} \sin \gamma_{21} \end{array} \right| + \bar{\mathbf{M}}_1 = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (1.48)$$

звідки

$$\begin{aligned} F_{3p} = \frac{F_1 \ell_{O1S1} \sin(\gamma_1 - \varphi_1)}{\ell_{O1P} \sin \gamma_{3p}} + \\ + \frac{R_{21} \ell_{O1A} \sin(\gamma_{21} - \varphi_1) + M_1}{\ell_{O1P} \sin \gamma_{3p}}. \end{aligned} \quad (1.49)$$

Якщо значення правої частини виразу (1.49) одержується зі знаком мінус, то  $\gamma_{3p} = 1,5\pi + \alpha_w$ .

Значення реакції  $\bar{\mathbf{R}}_{O1}$  визначимо з умови рівноваги ланки 1:

$$\bar{\mathbf{R}}_{O1} + \bar{\mathbf{F}}_1 + \bar{\mathbf{F}}_{3p} + \bar{\mathbf{R}}_{21} = \mathbf{0}, \quad (1.50)$$

або

$$(\mathbf{R}_{O1})_x = -(F_1 \cos \gamma_1 + F_{3p} \cos \gamma_{3p} + R_{21} \cos \gamma_{21}), \quad (1.51)$$

$$(\mathbf{R}_{O1})_y = -(F_1 \sin \gamma_1 + F_{3p} \sin \gamma_{3p} + R_{21} \sin \gamma_{21}).$$

Тоді

$$R_{O1} = \sqrt{(R_{O1})_x^2 + (R_{O1})_y^2}, \quad (1.52)$$

$$\gamma_{O1} = \begin{cases} \arctg((R_{O1})_y / (R_{O1})_x), \text{ якщо } (R_{O1})_x \geq 0, \\ \pi + \arctg((R_{O1})_y / (R_{O1})_x), \text{ якщо } (R_{O1})_x < 0. \end{cases} \quad (1.53)$$

Позначення, застосовані у схемі алгоритму програми SRWL1:

$l_{O1A}$  - довжина вхідної ланки 1;

$l_{O1S1}$  - розмір, що визначає положення центру мас на вхідній ланці;

$l_{O1P}$  - радіус початкового кола зубчастого колеса;

$\alpha_w$  - кут зачеплення;

$\varphi_1(I)$  - масив значень кута  $\varphi_1$ ;

$F_1(I)$  - масив значень головного вектора  $\overline{F}_1$ ;

$\gamma_1(I)$  - масив значень напрямного кута головного вектора  $\overline{F}_1$ ;

$R_{21}(I)$  - масив значень реакції  $\overline{R}_{21}$ ;

$\gamma_{21}(I)$  - масив значень напрямного кута реакції  $\overline{R}_{21}$ ;

$M_1(I)$  - масив алгебричних величин головного моменту  $\overline{M}_1$ ;

$(\varphi_1)_I$  - елемент масиву  $\varphi_1(I)$ ;

$(F_1)_I$  - елемент масиву  $F_1(I)$ ;

$(\gamma_1)_I$  - елемент масиву  $\gamma_1(I)$ ;

$(\gamma_3)_I$  - елемент масиву  $\gamma_3(I)$ ;

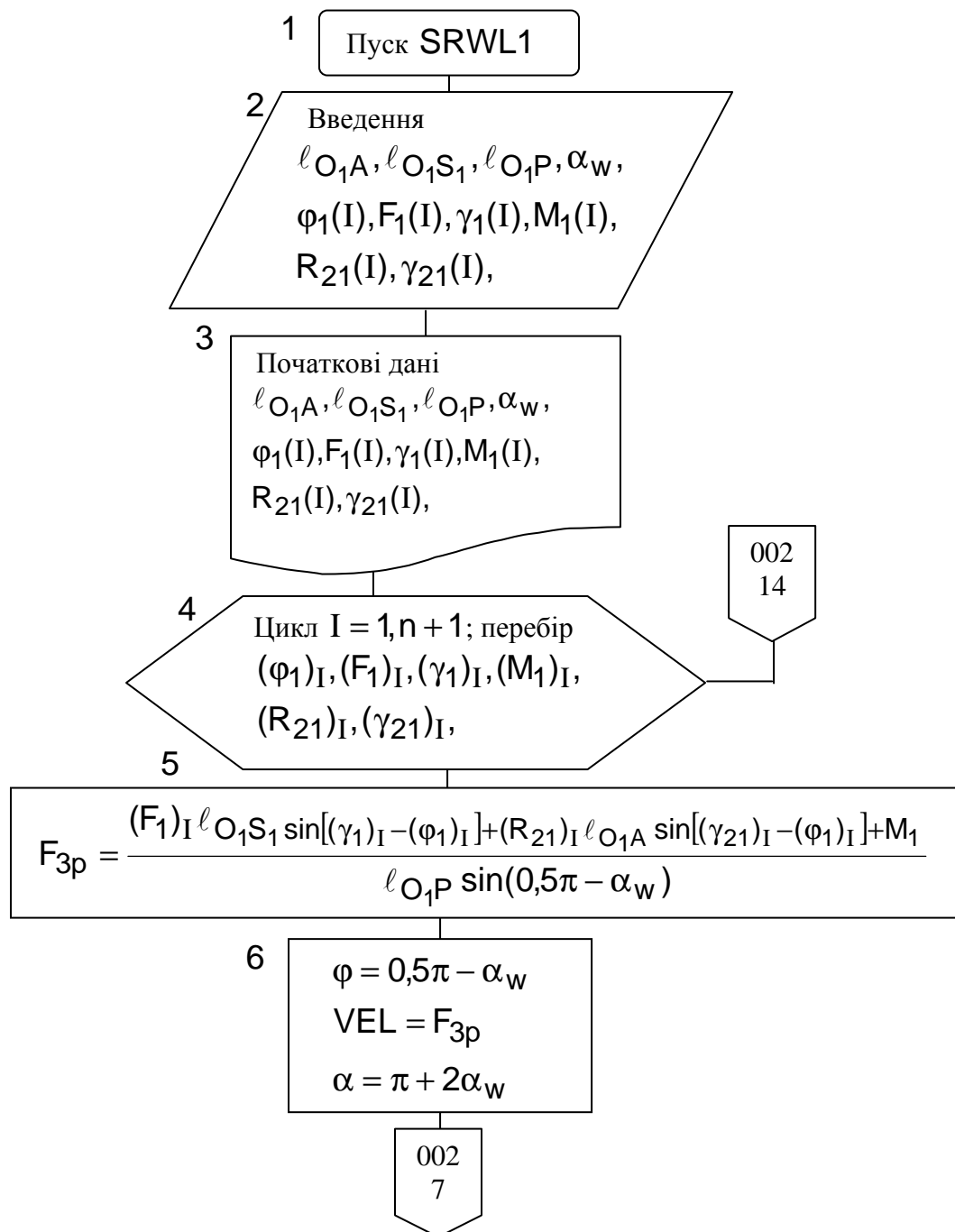
$F_{3p}$  - величина зрівноважувальної сили;

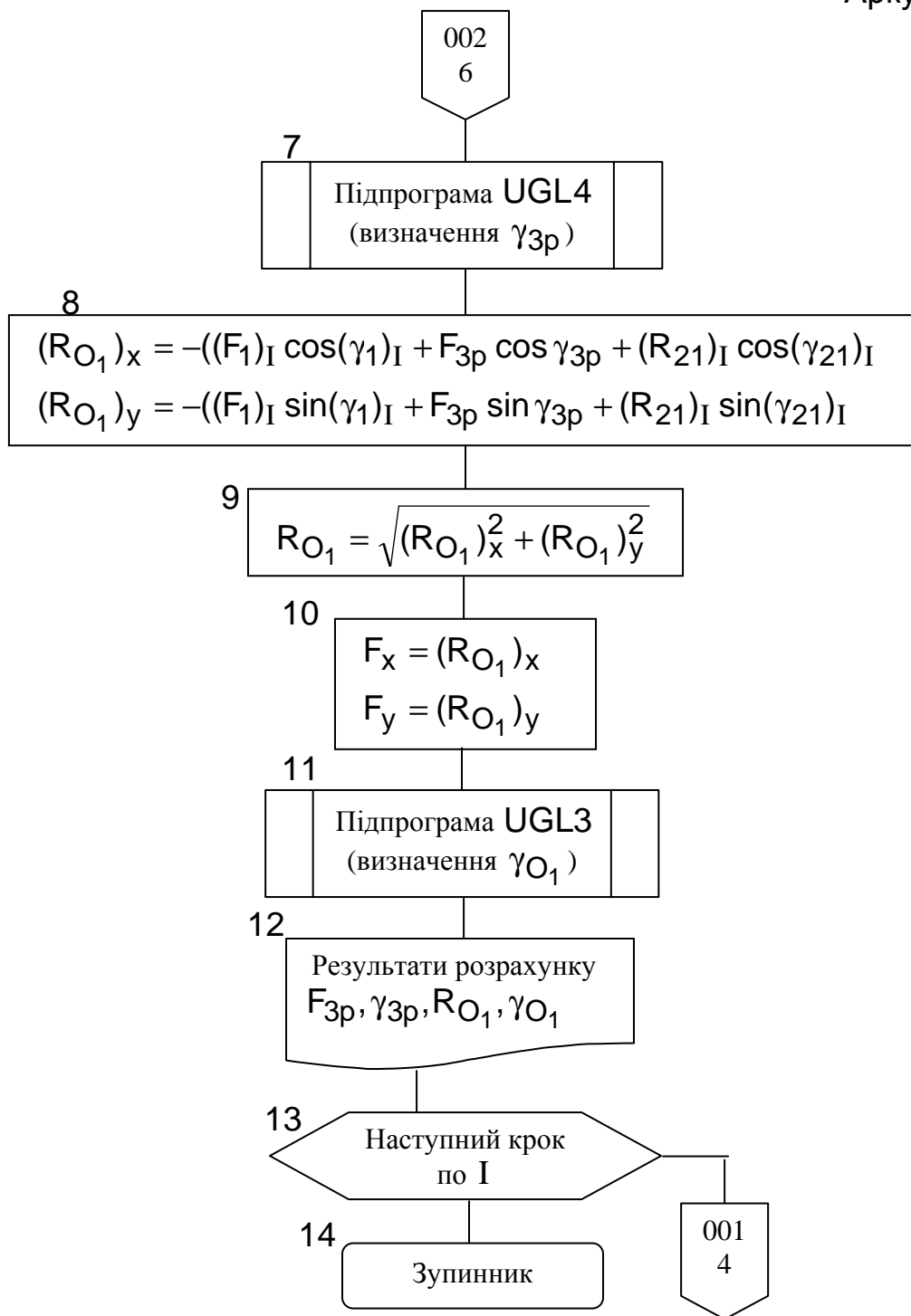
$\gamma_{3p}$  - напрямний кут зрівноважувальної сили  $\overline{F}_{3p}$ ;

$R_{O_1}$  - значення реакції  $\bar{R}_{O_1}$  від стояка на вхідну ланку 1 у шарнірі  $O_1$ ;  
 $\gamma_{O_1}$  - напрямний кут реакції  $\bar{R}_{O_1}$ .

Аркуш 001

Схема алгоритму програми SRWL1 визначення зрівноважувальної сили та реакції в кінематичній парі, що утворюють вхідна ланка та стояк





**1.4.2. Силовий розрахунок, якщо енергія від двигуна до вхідної ланки робочої машини (виконавчого механізму) передається за допомогою муфти (рис.1.6)**

Дано:  $\ell_{O_1A}$  - довжина вхідної ланки 1;  $\ell_{O_1S_1}$  - розмір, що визначає положення центру мас  $S_1$  вхідної ланки 1;  $\varphi_1$  - кут, що визначає положення вхідної ланки 1;  $\bar{F}_1$  - значення головного вектора відомих зовнішніх сил, що включає головний вектор сил інерції;  $\gamma_1$  - напрямний кут вектора  $\bar{F}_1$ ;  $R_{21} = |R_{12}|$  - значення реакції від структурної групи, першої у порядку нашарування;  $\gamma_{21} = \gamma_{12} + \pi$  - напрямний кут вектора  $\bar{R}_{21}$ ;  $M_1$  - алгебрична величина головного моменту відомих зовнішніх сил, що включає головний момент сил інерції.

Необхідно визначити зрівноважувальний момент  $M_{3P}$ , прикладений до вхідної ланки 1, та реакцію  $\bar{R}_{O_1}$  у шарнірі  $O_1$ .

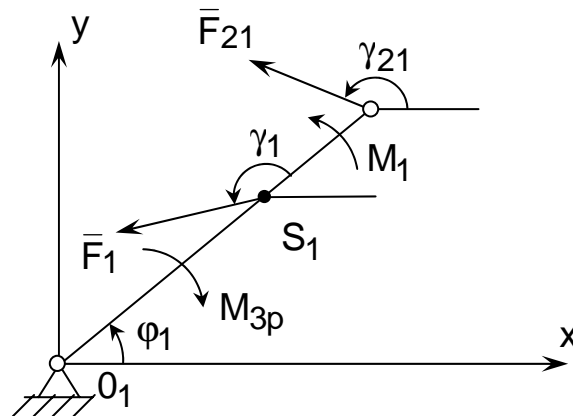


Рис. 1.6

Величину зрівноважувального моменту знаходимо із рівняння моментів

$$\Sigma \bar{M}_{O1} = \bar{M}_{3P} + \bar{M}_1 \times \bar{\ell}_{O_1A} + \bar{F}_{21} + \bar{\ell}_{O_1S_1} \times \bar{F}_1 = \mathbf{0}, (1.54)$$

або



$$\begin{aligned} \overline{M}_{3p} + \overline{M}_1 + \overline{k} \left| \begin{array}{l} \ell_{O_1A} \cos \varphi_1 \ell_{O_1A} \sin \varphi_1 \\ \mathbf{R}_{21} \cos \gamma_{21} \mathbf{R}_{21} \sin \gamma_{21} \end{array} \right| + \\ + \overline{k} \left| \begin{array}{l} \ell_{O_1S_1} \cos \varphi_1 \ell_{O_1S_1} \sin \varphi_1 \\ \mathbf{F}_1 \cos \gamma_1 \mathbf{F}_1 \sin \gamma_1 \end{array} \right| = 0, \end{aligned} \quad (1.55)$$

звідки

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{3p} = \mathbf{R}_{21} \ell_{O_1A} \sin(\gamma_{21} - \varphi_1) + \\ + \mathbf{F}_1 \ell_{O_1S_1} \sin(\gamma_1 - \varphi_1) + \mathbf{M}_1. \end{aligned} \quad (1.56)$$

Значення реакції  $\overline{\mathbf{R}}_{O_1}$  визначимо із рівняння рівноваги сил, що діють на вхідну ланку:

$$\overline{\mathbf{F}}_{21} + \overline{\mathbf{F}}_1 + \overline{\mathbf{R}}_{O_1} = \mathbf{0}, \quad (1.57)$$

звідки

$$(\mathbf{R}_{O_1})_x = -((\mathbf{F}_{21})_I \cos(\gamma_{21})_I + (\mathbf{F}_1)_I \cos(\gamma_1)_I);$$

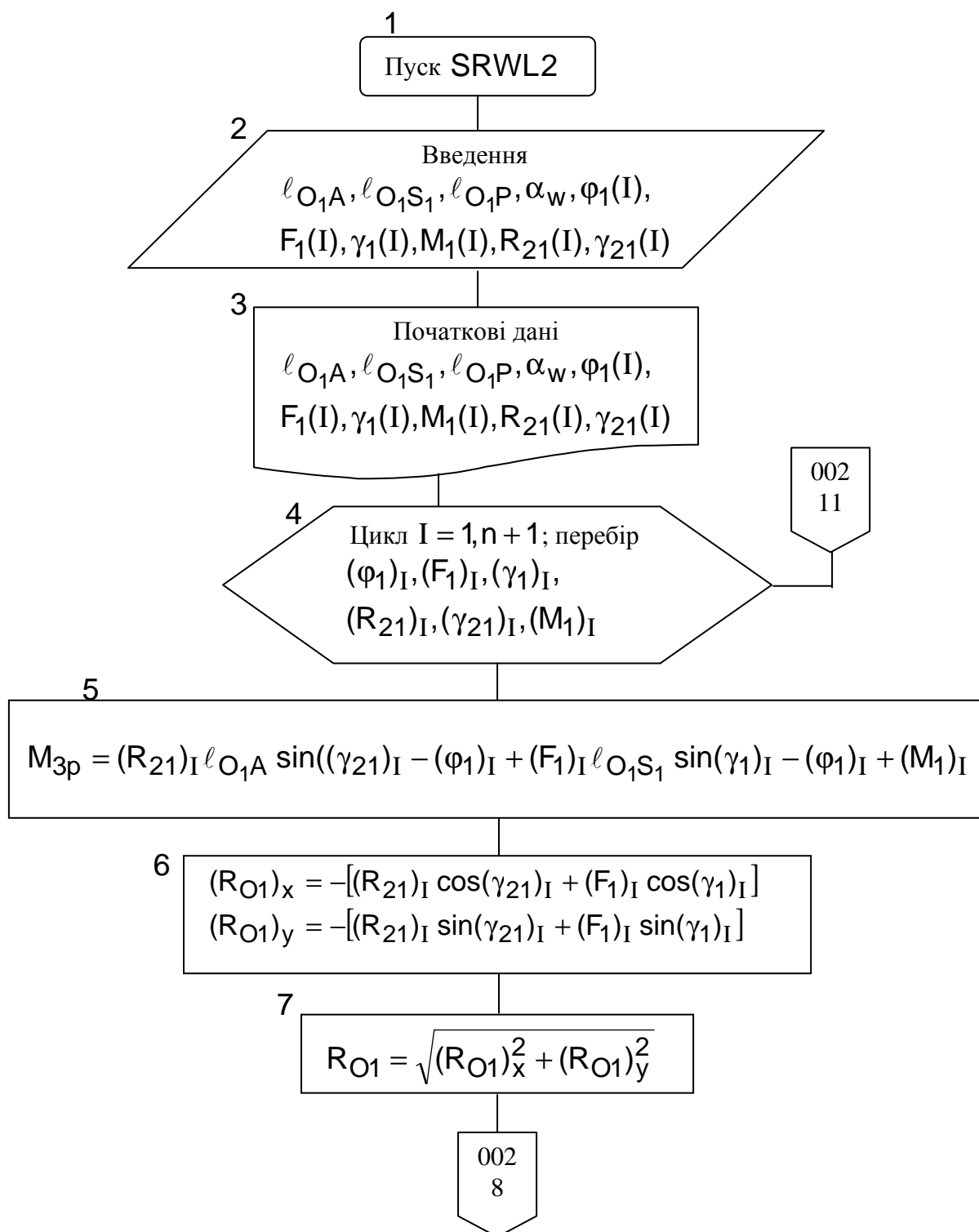
$$(\mathbf{R}_{O_1})_y = -((\mathbf{F}_{21})_I \sin(\gamma_{21})_I + (\mathbf{F}_1)_I \sin(\gamma_1)_I);$$

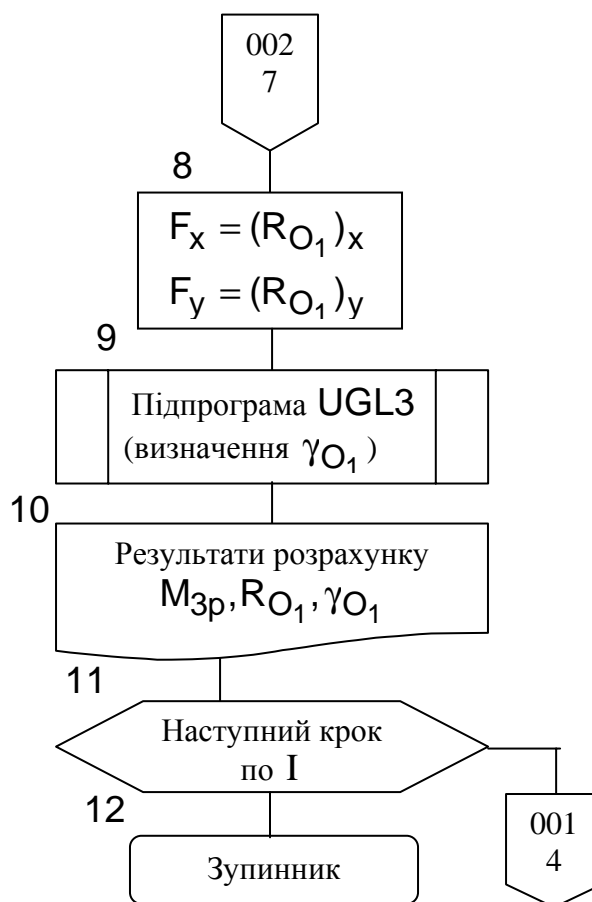
$$\mathbf{R}_{O_1} = \sqrt{(\mathbf{R}_{O_1})_x^2 + (\mathbf{R}_{O_1})_y^2}. \quad (1.58)$$

Тоді

$$\gamma_{O1} = \begin{cases} \arctg \left[ (\mathbf{R}_{O_1})_y / (\mathbf{R}_{O_1})_x \right], \text{ якщо } (\mathbf{R}_{O_1})_x \geq 0, \\ \pi + \arctg \left[ (\mathbf{R}_{O_1})_y / (\mathbf{R}_{O_1})_x \right], \text{ якщо } (\mathbf{R}_{O_1})_x < 0. \end{cases} \quad (1.59)$$

Схема алгоритму програми SRWL2 визначення зрівноважувального моменту та реакції в кінематичній парі, що утворюють вхідна ланка та стояк





Позначення, застосовані у схемі алгоритму програми SRWL2:

$l_{O_1A}$  - довжина вхідної ланки 1;

$l_{O_1S_1}$  - розмір, що визначає положення центру мас на вхідній ланці;

$\varphi_I(I)$  - масив значень кута  $\varphi_I$ ;

$F_I(I)$  - масив значень головного вектора  $\overline{F}_I$ ;

$\gamma_I(I)$  - масив значень напрямного кута головного вектора  $\overline{F}_I$ ;

$R_{2I}(I)$  - масив значень реакції  $\overline{R}_{2I}$ ;

$\gamma_{2I}(I)$  - масив значень напрямного кута реакції  $\overline{R}_{2I}$ ;

$M_I(I)$  - масив алгебричних величин головного моменту  $\overline{M}_I$ ;

$(\varphi_I)_I$  - елемент масиву  $\varphi_I(I)$ ;

$(F_1)_I$  - елемент масиву  $F_I(I)$ ;

$(\gamma_1)_I$  - елемент масиву  $\gamma_I(I)$ ;

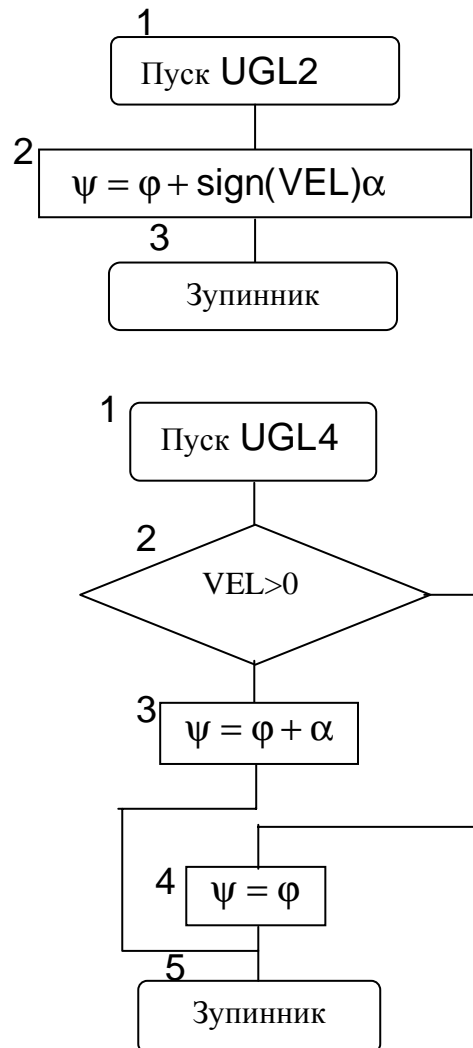
$(\gamma_3)_I$  - елемент масиву  $\gamma_3(I)$ ;

$M_{3p}$  - величина зрівноважувального моменту;

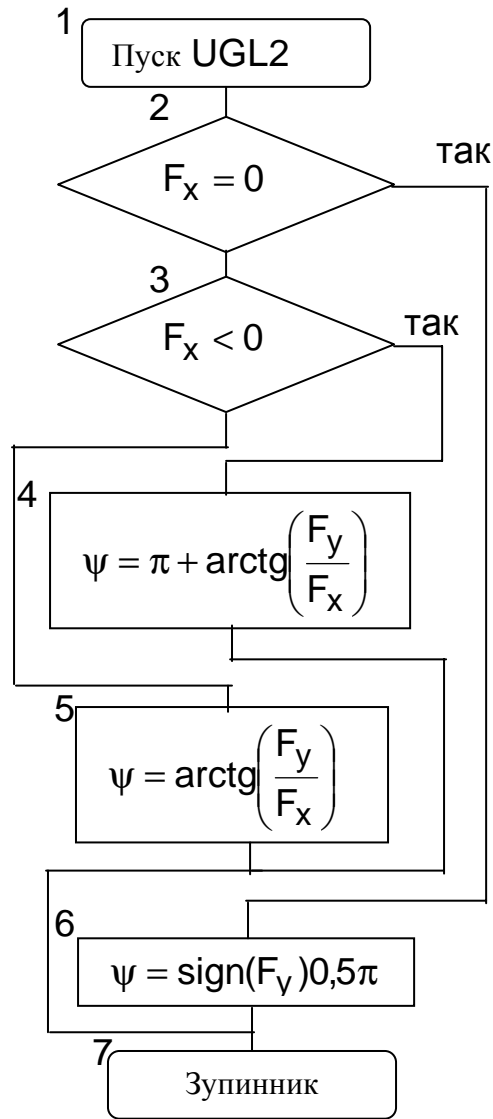
$R_{O_1}$  - значення реакції  $\bar{R}_{O_1}$  від стояка на вхідну ланку 1 у шарнірі  $O_1$ ;

$\gamma_{O_1}$  - напрямний кут реакції  $\bar{R}_{O_1}$ .

Схема  
алгоритмів підпрограм UGL2, UGL3, UGL4 \*



\* Нумерація підпрограм відповідає навчальному посібнику [ 2 ].



Позначення, застосовані у схемах алгоритмів підпрограм UGL2, UGL3, UGL4 :

UGL2:

$\psi$  - напрямний кут вектора;

$\varphi$  - кут, відносно якого визначається попередній напрямок вектора;

VEL - параметр визначення напрямку вектора;

$\alpha$  - додатковий кут.

UGL3:

$\psi$  - напрямний кут вектора;

$F_x, F_y$  - проекції вектора на координатні осі;

UGL4:

$\varphi$  - кут, що визначає лінію дії вектора;

$\alpha$  - додатковий кут;

VEL - логічний параметр;

$\psi$  - напрямний кут вектора.

### ***Бібліографічний список***

1. Белоконев И.М. Теория механизмов и машин. Методы автоматизированного проектирования.- К., 1990.

2. Шебанов І.Г. Кінематичний синтез та аналіз авіаційних механізмів з використанням ПЕОМ.- Х., 2002.

3. Шебанов І.Г. Аналіз механізмів авіадвигунів і літальних апаратів. - Х., 1997.

Шебанов Ігор Георгійович

ДИНАМІЧНИЙ СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ  
АВІАЦІЙНИХ МЕХАНІЗМІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕОМ.  
СИЛОВИЙ РОЗРАХУНОК

Редактор Л.О. Кузьменко

Зв. план, 2003

Підписано до друку 24.09.2003

Формат 60x84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк.

Ум. друк. арк. 2,6. Обл.-вид. арк. 2,93. Наклад 10 прим. (електронне видання). Замовлення 439. Ціна вільна

---

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)