

УДК 621.828.3

## ПРОЕКТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНЕРЦИОННОЙ СИММЕТРИИ (КОНСТРУКТИВНОЙ УРАВНОВЕШЕННОСТИ) РОТАЦИОННОГО АГРЕГАТА

**О.О. ПОЛУШКИН**

(Донской государственный технический университет)

*Рассмотрены и формализованы для решения на ЭВМ задачи анализа неуровновешенности ротационного агрегата от установки его периферийных рабочих элементов (ножей, молотков и т.п.) и проектного синтеза его инерционно-симметричной (уравновешенной) конструкции.*

**Ключевые слова:** ротационный агрегат, конструктивная уравновешенность.

**Введение.** Задачи анализа и синтеза инерционно-симметричного ротационного агрегата стоят первыми при проектировании любых машин ротационного действия. Накоплен значительный опыт их решения посредством корректировки локальных дисбалансов, обусловленных наличием в конструкции ротационного агрегата инерционно-несимметричных (эксцентричных) элементов (кулачка, флажка отметчика оборотов и т.п.).

На кафедре «Теория механизмов и машин» ДГТУ эти задачи решены и для винтовой цилиндрической пружины, ось которой совпадает с осью ротора [1]. Для нее обоснована невозможность создания уравновешенной конструкции, поэтому на стадии проектирования ротационного агрегата с такой пружиной необходимо априори вводить корректирующие дисбалансы, устраняющие неуровновешенность пружины, характеристики которой определяют по полученным соотношениям через конструктивные параметры пружины.

Вместе с тем такие задачи не решены для ротационных агрегатов, представляющих собой рабочие органы машин, которые, в отличие от агрегатов контрприводного типа, имеют рабочие элементы (например, ножи ротационных измельчающих и режущих аппаратов, молотки дробилок и т.п.). Как правило, такие элементы имеют одинаковые номинальные значения массы  $m_0$  и радиуса  $R_0$  расположения центров масс каждого из них на собранном и установленном на машине агрегате. Поэтому значения локальных дисбалансов  $\bar{D}_i$  от установки на роторе каждого  $i$ -го рабочего элемента

$$D_i = D_0 = m_0 R_0 = \text{const}.$$

**Постановка задачи.** Для проектного обеспечения инерционной симметрии создаваемого ротационного рабочего органа полная совокупность локальных дисбалансов от установки всех его рабочих элементов должна быть конструктивно уравновешена. Это будет иметь место, если в каждой  $j$ -й плоскости, перпендикулярной оси вращения агрегата, будет установлено  $n_j \geq 2$  рабочих элементов с обеспечением условия инерционной симметрии их расположения, т.е.

$$\bar{D}_j = \sum_{i=1}^{n_j} \bar{D}_{ij} = \sum_{i=1}^{n_j} D_0 e^{i\varphi_i} = D_0 \sum_{i=1}^{n_j} e^{i\varphi_i} = 0,$$

или

$$\sum_{i=1}^{n_j} \cos \varphi_i = 0; \quad \sum_{i=1}^{n_j} \sin \varphi_i = 0, \quad j = 1, \dots, n_k, \quad (1)$$

где  $\varphi_i$  – углы расположения центров масс  $n_j$  рабочих элементов в плоскости  $j$  их установки.

Эти условия выполняются, если все  $n_j > 1$  одинаковых рабочих элементов, установленных в каждой плоскости  $j=1, \dots, n_k$  ротационного агрегата на расстояниях  $R_0$  от его оси, равноудалены друг от друга на угол  $\varphi_0 = 2\pi/n_j$ . При этом  $\varphi_i = (i-1)\varphi_0, i=1, \dots, n_j$ .

Как правило,  $n_j$  инвариантно относительно  $j$ , однако в дальнейших выкладках допускается его вариация.

Дополнительные технологические и эксплуатационные требования к конструкции создаваемого ротационного рабочего органа машины могут потребовать такого размещения его рабочих элементов, которое не обеспечивает выполнение условий (1). Так, сокращение материалоемкости агрегата и исключение дублирования функций рабочих элементов за оборот ротора заставляют проектировщика размещать рабочие элементы по одному в каждой из плоскостей  $j=1, \dots, n_k$  их расположения, перпендикулярных оси ротора. Для увеличения плавности вращения (ликвидации ударов при работе) проектировщики располагают рабочие элементы ротационных агрегатов на цилиндрической поверхности не по ее образующей (параллельно оси ротора), а по отрезку спирали с обеспечением полного перекрытия.

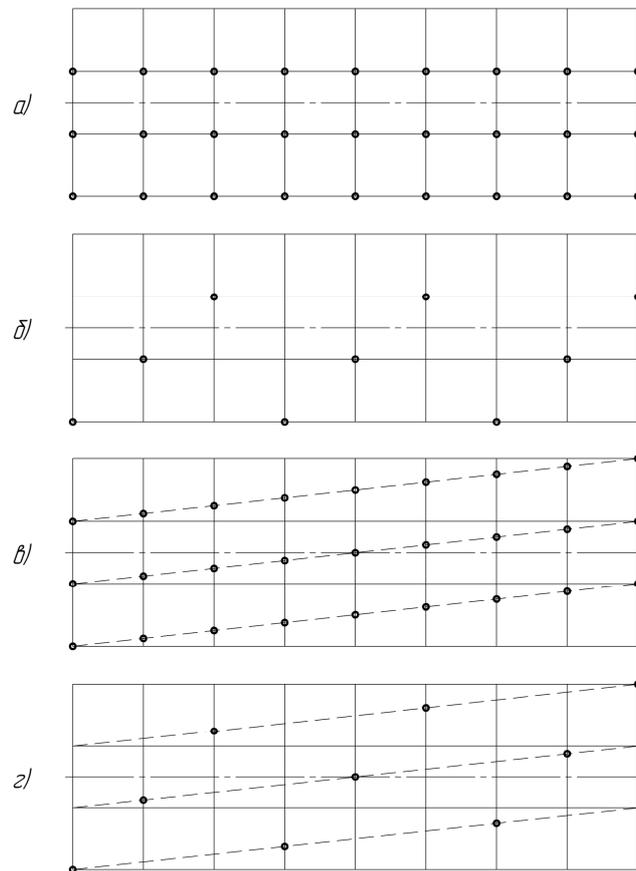


Рис.1. Варианты схем установки рабочих элементов (•) на ротационном агрегате при  $n_k=9, n_j=3$

На развертках представлены различные варианты установки рабочих элементов на цилиндрической поверхности ротационного агрегата при числе рядов их установки  $n_j = 3$  вдоль оси агрегата и числе плоскостей  $n_k = 9$ , перпендикулярных этой оси и содержащих рабочие элементы (рис.1). При этом, в отличие от рис.1, а, удовлетворяющего условиям (1), вариант схемы установки на рис.1, б не обеспечивает инерционной симметрии расположения рабочих элементов, хотя и

позволяет в три раза сократить их число без дублирования функций за оборот ротора. Схемы установки на рис.1, в, г обеспечивают повышенную плавность вращения агрегата при работе посредством размещения рабочих элементов по отрезку винтовой линии с полным перекрытием. Если при этом схема установки на рис.1, в отвечает условиям (1) инерционной симметрии размещения рабочих элементов агрегата, то схема установки на рис.1, г, обеспечивая снижение материалоемкости агрегата, не отвечает этим условиям.

Представленные варианты размещения рабочих элементов (см. рис.1) не являются исчерпывающими даже для  $n_j = 3, n_k = 9$ . Творческая мысль проектировщика, стремящегося обеспечить наибольшую эффективность создаваемого ротационного рабочего органа при его изготовлении и в процессе эксплуатации и потому принимающего в учет множество условий и требований к его конструкции, не связанных с ее уравновешенностью, может привести к необходимости нетривиального размещения рабочих элементов в  $n_j$  рядах и  $n_k$  плоскостях, перпендикулярных оси ротора, по самым различным схемам. Поэтому для каждой такой схемы необходимо оценивать инерционную симметрию размещения рабочих элементов и, если условия (1) не выполняются, находить главный вектор  $\bar{D}_{ст}$  и главный момент  $\bar{M}_D$  конструктивных дисбалансов от принятой схемы размещения рабочих элементов и на проектной стадии предусмотреть их корректировку.

**Решение задачи.** Рассмотрим схему с произвольным размещением рабочих элементов на цилиндрической поверхности ротационного агрегата в  $i = 1, \dots, n_j$  равноотстоящих по окружности рядах и в  $j = 1, \dots, n_k$  равноотстоящих вдоль оси ротора плоскостях, перпендикулярных этой оси. Обобщенная схема размещения рабочих элементов ротационного агрегата и его развертка для случаев их расположения на образующей цилиндрической поверхности (рабочие элементы обозначены как ●) и на отрезке спирали (рабочие элементы обозначены как ○) представлена на рис.2. Для отсчета углов  $\varphi_i$  положения рабочих элементов на окружности ротора ввели ось  $x$  (рис.2, а) так, чтобы эти углы отсчитывались против часовой стрелки. В этом же направлении должен осуществляться и отсчет углов поворота спирали.

Введем идентификатор  $u$ , определяющий принятый проектировщиком характер размещения рабочих элементов вдоль оси агрегата. При их размещении по образующей цилиндрической поверхности (элементы ● на рис.2)  $u=0$ ; при размещении по отрезку спирали с единичным перекрытием (элементы ○ на рис.2)  $u=1$ . Тогда угол установки рабочего элемента в  $i$ -м ряду  $j$ -й плоскости приведения, перпендикулярной оси ротора, определяется как

$$\varphi_{ij} = \frac{2\pi}{n_j}(i-1) + u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1}. \quad (2)$$

Введем матрицу  $[D_{ij}]$  размера  $n_j \times n_k$  размещения рабочих элементов на цилиндрической поверхности ротора, которая строится по ее развертке. Если в  $i$ -м ряду  $j$ -й плоскости размещен рабочий элемент, то элемент  $i$ -й строки  $j$ -го столбца матрицы  $[D_{ij}]$  принимается равным единице. В противном случае (рабочий элемент отсутствует) этот элемент матрицы  $[D_{ij}]$  полагается равным нулю. Так, для варианта схемы на рис.1, а эта матрица будет иметь вид:

$$[D_{ij}] = D_0 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

при  $u = 0$ ; для схемы на рис.1, в эта матрица будет иметь тот же вид при  $u = 1$ . Для схемы на рис.1, б эта матрица представляется как

$$[D_{ij}] = D_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

при  $u = 0$ ; для схемы на рис.1, г эта матрица будет иметь такой же вид при  $u = 1$ .

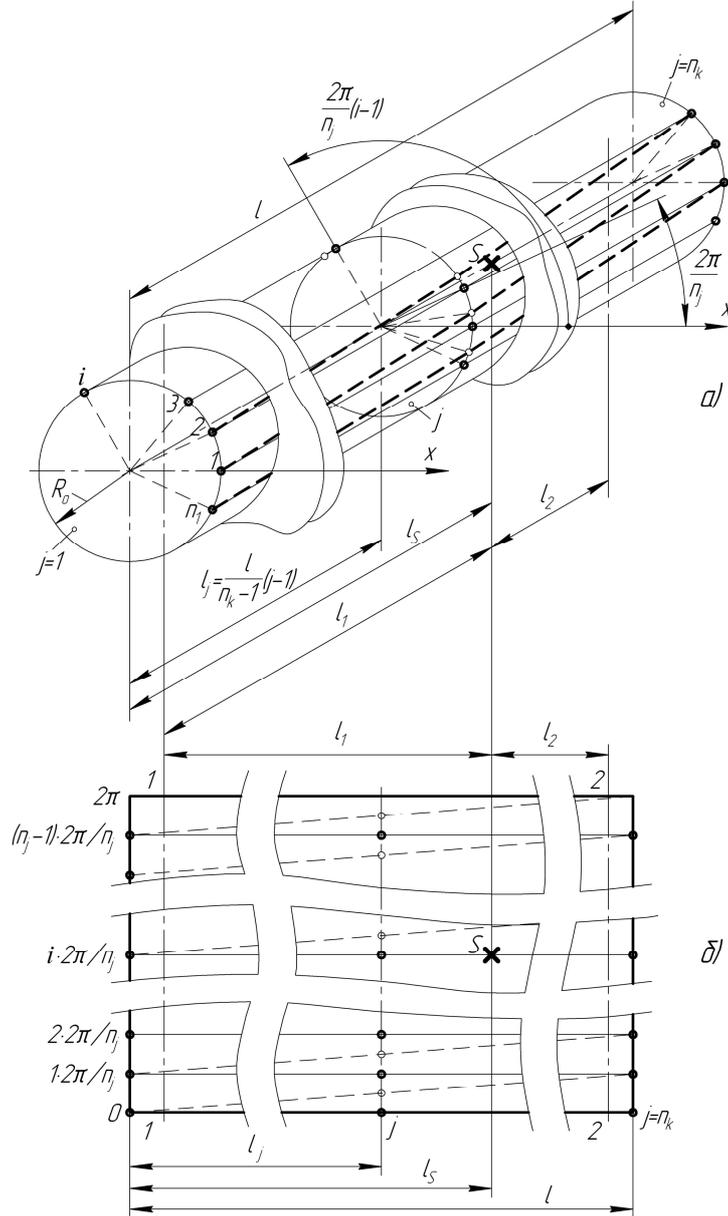


Рис. 2. Обобщенная модель ротационного агрегата с рабочими элементами (•) или (о) (а) и его развертка (б)

Используя рис.2, находим проекцию на ось  $x$  дисбалансов в  $j$ -й плоскости приведения от установленных в этой плоскости рабочих элементов агрегата для общего случая  $u = 1$ :

$$D_x^j = \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos \varphi_{ij} ,$$

что с учетом (2) позволяет получить:

$$D_x^j = \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) + u \frac{2\pi}{n_j} \cdot \frac{j-1}{n_k-1} \right].$$

Суммируя  $D_x^j$  по всем плоскостям приведения, находим проекцию на ось  $x$  главного вектора дисбалансов агрегата от установки его рабочих элементов:

$$D_x = \sum_{j=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) + u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right]. \quad (3)$$

Аналогичным образом определяется проекция на ось  $y$  главного вектора дисбалансов агрегата от его рабочих элементов:

$$D_y = \sum_{j=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) + u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right]. \quad (4)$$

Значение  $D_{ct}$  и угол  $\varphi_D$  главного вектора дисбалансов агрегата от установки его рабочих элементов определяются как

$$D_{ct} = \sqrt{D_x^2 + D_y^2}; \quad \varphi_D = \text{sign} D_y \arccos \frac{D_x}{D_{ct}}. \quad (5)$$

Проекция на ось  $x$  и  $y$  главного момента дисбалансов агрегата от установки его рабочих элементов

$$M_{D_x} = \sum_{j=1}^{n_k} \left[ \frac{l}{n_k-1} (j-1) - l_s \right] \sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) + u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right], \quad (6)$$

$$M_{D_y} = \sum_{j=1}^{n_k} \left[ l_s - \frac{l}{n_k-1} (j-1) \right] \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) + u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right], \quad (7)$$

где  $l_s$  – расстояние от первой плоскости приведения ( $j=1$ ) до центра масс всей совокупности рабочих элементов агрегата.

Значение  $M_D$  главного момента дисбалансов от установки всех рабочих элементов агрегата и его угол  $\varphi_M$  определяются соотношениями:

$$M_D = \sqrt{M_{D_x}^2 + M_{D_y}^2}; \quad \varphi_M = \text{sign} M_{D_y} \arccos \frac{M_{D_x}}{M_D}. \quad (8)$$

Для формализации расчетов характеристик  $D_{ct}$ ,  $\varphi_D$ ,  $M_D$ ,  $\varphi_M$  неуравновешенности представим зависимости (3), (4), (6), (7), необходимые для их расчета, в матричном виде. При этом учитываем, что

$$\begin{aligned} D_x &= \sum_{j=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right] \cos \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right] - \\ &- \sum_{j=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right] \sin \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right] = \\ &= \sum_{j=1}^{n_k} \cos \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right] \sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right] - \\ &- \sum_{j=1}^{n_k} \sin \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right] \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогично получим:

$$D_y = \sum_{j=1}^{n_k} \cos \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k} \right] \sum_{i=1}^{n_j} \sin \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right] + \sum_{j=1}^{n_k} \sin \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right] \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right], \quad (10)$$

$$M_{D_x} = \sum_{j=1}^{n_j} \left[ \frac{l}{n_k-1} (i-1) - l_s \right] \cos \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k} \right] \sum_{i=1}^{n_j} \sin \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right] + \sum_{j=1}^{n_j} \left[ \frac{l}{n_k-1} (j-1) - l_s \right] \sin \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right] \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right], \quad (11)$$

$$M_{D_y} = - \sum_{j=1}^{n_j} \left[ \frac{l}{n_k-1} (i-1) - l_s \right] \cos \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k} \right] \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right] + \sum_{j=1}^{n_j} \left[ \frac{l}{n_k-1} (j-1) - l_s \right] \sin \left[ u \frac{2\pi}{n_j} \frac{j-1}{n_k-1} \right] \sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin \left[ \frac{2\pi}{n_j} (i-1) \right]. \quad (12)$$

Вводя матрицы

$$[\varphi_i] = \frac{2\pi}{n_j} [0 \ 1 \ 2 \ \dots \ i \ \dots \ (n_j-1)] - \text{размера } (1 \times n_j),$$

$$\{\varphi_j\} = u \frac{2\pi}{n_j(n_k-1)} \{0 \ 1 \ 2 \ \dots \ j \ \dots \ (n_k-1)\} - \text{размера } (n_k \times 1),$$

$$[l_j] = \frac{l}{n_k-1} \text{diag}[0 \ 1 \ 2 \ \dots \ j \ \dots \ (n_k-1)] - \text{размера } (n_k \times n_k),$$

$$[E_{n_k}] - \text{диагональная единичная матрица размера } (n_k \times n_k),$$

а также рассчитав матрицы  $[\cos \varphi_i]$ ,  $[\sin \varphi_i]$ ,  $\{\cos \varphi_j\}$ ,  $\{\sin \varphi_j\}$ , проекции  $\overline{D_{ct}}$  и  $\overline{M_D}$  на координатные оси запишем в виде:

$$D_x = [\cos \varphi_i][D_{ij}]\{\cos \varphi_j\} - [\sin \varphi_i][D_{ij}]\{\sin \varphi_j\}, \quad (13)$$

$$D_y = [\sin \varphi_i][D_{ij}]\{\cos \varphi_j\} + [\cos \varphi_i][D_{ij}]\{\sin \varphi_j\}, \quad (14)$$

$$M_{D_x} = [\sin \varphi_i][D_{ij}](\{l_j\} - l_s[E_{n_k}])\{\cos \varphi_j\} + [\cos \varphi_i][D_{ij}](\{l_j\} - l_s[E_{n_k}])\{\sin \varphi_j\}, \quad (15)$$

$$M_{D_y} = -[\cos \varphi_i][D_{ij}](\{l_j\} - l_s[E_{n_k}])\{\sin \varphi_j\} + [\sin \varphi_i][D_{ij}](\{l_j\} - l_s[E_{n_k}])\{\cos \varphi_j\}. \quad (16)$$

В случае  $u=0$  имеем  $\{\cos \varphi_j\} = \{E_{n_k}\}$  – единичная матрица-столбец размера  $(n_k \times 1)$ ;  $\{\sin \varphi_j\}$  – нулевая матрица-столбец размера  $(n_k \times 1\sqrt{2})$  и уравнения (13)-(16) для расчета проекций  $\overline{D_{ct}}$ ,  $\overline{M_D}$  на координатные оси существенно упрощаются:

$$D_x = [\cos \varphi_i][D_{ij}]\{E_{n_k}\},$$

$$D_y = [\sin \varphi_i][D_{ij}]\{E_{n_k}\},$$

(17)

$$M_{D_x} = [\sin \varphi_i][D_{ij}](\{l_j\} - l_s[E_{n_k}]),$$

$$M_{D_y} = -[\cos \varphi_i][D_{ij}](\{l_j\} - l_s[E_{n_k}]),$$

где  $\{l_j\} = [l_j]\{E_{n_k}\} = \frac{l}{n_k-1} \{0 \ 1 \ 2 \ \dots \ j \ \dots \ (n_k-1)\}$  – матрица-столбец размера  $(n_k \times 1)$ .

Значения и углы  $\overline{D}_{ct}$ ,  $\overline{M}_D$  определяются по формулам (5), (8), и если  $D_{ct} \neq 0$  и (или)  $\overline{M}_D$ , то в конструкцию агрегата надо заранее вносить корректирующие дисбалансы в двух произвольно определенных (отстоящих от  $S$  на расстоянии  $l_1$  и  $l_2$  (см. рис.2)) плоскостях коррекции. Используя известные [2, 3] уравнения приведения главного вектора  $\overline{D}_{ct}$  и главного момента  $\overline{M}_D$  к двум дисбалансам в этих плоскостях коррекции, получаем следующий алгоритм расчета значений и углов корректирующих дисбалансов  $\overline{D}_{k1}$ ,  $\overline{D}_{k2}$  и значений корректирующих масс  $m_{k1}$ ,  $m_{k2}$ :

$$\begin{aligned}
 D_{1x} &= \frac{D_{ct} l_2 \cos \varphi_D + M_D \sin \varphi_M}{l_1 + l_2}, & D_{1y} &= \frac{D_{ct} l_2 \sin \varphi_D - M_D \cos \varphi_M}{l_1 + l_2}, \\
 D_{k1} &= \sqrt{D_{1x}^2 + D_{1y}^2}, & \varphi_{k1} &= \pm \pi + \text{sign}(D_{1y}) \arccos \frac{D_{1x}}{D_{k1}} \leq 2\pi, \\
 D_{2x} &= \frac{D_{ct} l_1 \cos \varphi_D - M_D \sin \varphi_M}{l_1 + l_2}, & D_{2y} &= \frac{D_{ct} l_1 \sin \varphi_D + M_D \cos \varphi_M}{l_1 + l_2}, \\
 D_{k2} &= \sqrt{D_{2x}^2 + D_{2y}^2}, & \varphi_{k2} &= \pm \pi + \text{sign}(D_{2y}) \arccos \frac{D_{2x}}{D_{k2}} \leq 2\pi; \\
 m_{k1} &= D_{k1} / R_{k1}, & m_{k2} &= D_{k2} / R_{k2},
 \end{aligned} \tag{18}$$

где  $R_{k1}$ ,  $R_{k2}$  – принимаемые проектировщиком радиусы установки корректирующих масс  $m_{k1}$ ,  $m_{k2}$  в соответствующих плоскостях коррекции 1-1, 2-2 (рис.2, б) создаваемого агрегата.

Разместив на чертеже отдельные детали с массами  $m_{k1}$ ,  $m_{k2}$  в соответствующих точках плоскостей 1-1, 2-2, определенных углами  $\varphi_{k1}$ ,  $\varphi_{k2}$  и радиусами  $R_{k1}$ ,  $R_{k2}$ , проектировщик конструктивно корректирует неуравновешенность агрегата, вносимую инерционно-несимметричной установкой его рабочих элементов. Если же предусмотрена инерционно-симметричная установка рабочих элементов с выполнением условий (1), то расчеты корректирующих дисбалансов и их размещение в конструкции создаваемого агрегата не производятся.

Приведенные соотношения являются общими, так как могут быть использованы при любом (принятом проектировщиком и обоснованном теми или иными конструктивными, технологическими или эксплуатационными причинами) размещении рабочих элементов по цилиндрической поверхности создаваемого ротационного агрегата. Это размещение учитывается конфигурацией исходно задаваемой матрицы  $[D_{ij}]$ , формируемой по схеме развертки, отмеченной цилиндрической поверхности, с учетом указанных замечаний.

Блок-схема алгоритма, формализующего решение задачи обеспечения инерционной симметрии проектируемого ротационного агрегата представлена на рис.3. Из пояснений к этой блок-схеме отметим следующее:

– в блоке 2 вводятся критерии  $t$  и  $q$ :  $t=1$ , если агрегат имеет в своем составе детали (сборочные единицы), заведомо имеющие неуравновешенные массы (кулачки, отметчики оборотов и т.п.), при отсутствии таких деталей  $t=0$ ;  $q=1$ , если агрегат имеет в своем составе рабочие элементы (ножи, молотки, бичи и т.п.), расположенные на периферийной цилиндрической поверхности,  $q=0$  при отсутствии таких элементов;



стями приведения агрегата;  $D_0$  – значение дисбаланса, вносимого в конструкцию агрегата одним рабочим элементом, определенное выше;  $[D_{ij}]$  – введенная и поясненная выше матрица размещения рабочих элементов на цилиндрической поверхности агрегата, формируемая с помощью построения развертки этой поверхности (например, см. рис.1);  $l_1, l_2$  – осевые расстояния от принятых плоскостей коррекции 1-1, 2-2 дисбалансов рабочих элементов до центра  $S$  масс полной совокупности этих элементов (см. рис.2, б);  $R_{k1}, R_{k2}$  – радиусы установки корректирующих масс в плоскостях коррекции 1-1, 2-2. В блоке 8 дополнительно вводятся: значение  $u$ , определяющее способ размещения рабочих элементов вдоль оси агрегата ( $u = 0$ , если рабочие элементы размещены по образующей цилиндрической поверхности (см. рис.1, а, б);  $u = 1$ , если эти элементы размещены на отрезке спирали (см. рис.1, в, г);  $[E_{n_k}]$  – диагональная единичная матрица размера  $(n_k \times n_k)$ ;  $\{E_{n_k}\}$  – матрица-столбец с единичными элементами размера  $(n_j \times 1)$ ;

– в блоках 9-14 проводится оценка инерционной симметрии размещения рабочих элементов агрегата. Если условие инерционной симметрии их расположения выполняется ( $A = 0, B = 0$ ), то от блока 14 расчет переходит к блоку 25. Если это условие не выполняется ( $A$  и (или)  $B$  не обращаются в ноль), то расчет переходит к блоку 15;

– в блоках 15-22 осуществляется расчет корректирующих масс  $m_{k1}, m_{k2}$  и углов  $\varphi_{k1}, \varphi_{k2}$  их установки в плоскостях коррекции 1-1, 2-2 проектируемого агрегата, которые выдаются на печать в блоке 23;

- блок 24 содержит информацию для проектировщика о необходимости спроектировать детали агрегата массой  $m_{k1}, m_{k2}$ , которые необходимо изобразить на его чертеже на углах  $\varphi_{k1}, \varphi_{k2}$  в плоскостях 1-1, 2-2 на расстояниях  $R_{k1}, R_{k2}$  от центров масс этих деталей до оси агрегата, жестко соединив их с агрегатом;

- блоки 25, 26 представляют проектировщику информацию о результатах анализа и синтеза инерционной симметрии идеально исполненной конструкции проектируемого ротационного агрегата машины;

- блок 27 – конец расчетов.

Представленный алгоритм позволяет формализовать решение задачи проектного обеспечения конструктивной уравновешенности любого ротационного агрегата.

**Заключение.** Создан формализованный для использования на ЭВМ алгоритм решения задач анализа неуравновешенности и синтеза инерционно-симметричной конструкции любого ротационного агрегата, гарантирующий обеспечение его конструктивной уравновешенности. Однако это не исключает необходимости балансировки такого агрегата при его изготовлении для ликвидации неуравновешенности от технологических источников.

#### Библиографический список

1. Справочник по балансировке /М.Е. Левит, Ю.А. Агафонов, Л.Д. Вайнгортин [и др.]; под общ. ред. М.Е. Левита. – М.: Машиностроение, 1992. – 464 с.
2. ГОСТ 22061-76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 136 с.
3. Полушкин О.А. Теоретические основы балансировки роторов. Типовые методы определения дисбалансов: метод. указания. Вып.1 / О.А. Полушкин, В.А. Фокин. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1994. – 29 с.

Материал поступил в редакцию 29.03.2011.

## **References**

1. Spravochnik po balansirovke / M.E. Levit, Yu.A. Agafonov, L.D. Vajngortin [i dr.]; pod. obshh. red. M.E. Levita. – M.: Mashinostroenie, 1992. – 464 s. – In Russian.
2. GOST 22061-76. Mashiny` i texnologicheskoe oborudovanie. Sistema klassov tochnosti balansirovki. Osnovny`e polozheniya. – M.: Izd-vo standartov, 1984. – 136 s. – In Russian.
3. Polushkin O.A. Teoreticheskie osnovy` balansirovki rotorov. Tipovy`e metody` opredeleniya disbalansov: metod. ukazaniya. Vy`p.1 / O.A. Polushkin, V.A. Fokin. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 1994. – 29 s. – In Russian.

## **ROTOR INERTIA SYMMETRY (DESIGN BALANCE) PROJECT SUPPORT**

### **O.O. POLUSHKIN**

(Don State Technical University)

*Analysis problems of rotor imbalance from its peripheral working parts (hummers, knives, etc.) installation and the specified synthesis of its inertia symmetrical (balanced) structure are considered and formalized for the computing.*

**Keywords:** rotor, design balance.