

## ОПТИМИЗАЦИЯ БАЛАНСРОВКИ ГИБКИХ РОТОРОВ С ПОМОЩЬЮ СИМПЛЕКС-МЕТОДА

**В.И. Симоновский**, *д-р техн наук, профессор;*

**А.С. Угничев**, *аспирант,*

*Сумский государственный университет, г. Сумы*

*Предложен способ определения оптимального расположения плоскостей коррекции для балансировки ротора на основе использования экспериментальных или расчетных динамических коэффициентов влияния.*

### ВВЕДЕНИЕ

Балансировка гибких роторов требует использования трех и более плоскостей коррекции. Поскольку имеется возможность выбора этих плоскостей, то очевидно, что для каждого конкретного ротора существует оптимальная (в определенном смысле) комбинация точек установки балансировочных грузов. Ниже рассмотрен способ нахождения такого сочетания плоскостей коррекций, которое (при заданном количестве плоскостей) дает наибольший эффект снижения уровня вибраций при существенно меньших величинах уравнивающих масс. При этом используются частотные характеристики динамических коэффициентов влияния (ДКВ) в опорных точках, которые могут быть как экспериментальными, полученными, например, на вакуумном балансировочном стенде [1], так и расчетными, определенными на ПК по программам расчёта вынужденных колебаний. Для использования симплекс-метода кривые ДКВ заменяются ломанными линиями.

### ИЗЛОЖЕНИЕ СПОСОБА

Зона рабочих колес ротора центробежной машины разбивается на участки в количестве, равном числу намечаемых плоскостей коррекций. На каждый участок приходится несколько рабочих колёс, каждое из которых может быть использовано для уравнивания путём съёма на нем металла. Идея способа заключается в предположении, что оптимальными являются те плоскости коррекции, при расположении в которых одинаковых дисбалансов суммарное воздействие их на обе опоры будет максимальным. Отсюда вытекает математическое формулирование функции цели, заключающееся в нижеследующем. Пусть  $W_1(z)$  и  $W_2(z)$  – динамические коэффициенты влияния соответственно для первой и второй опор ротора. Например,  $W_1(z)$  численно равен динамическому прогибу (или виброскорости) на первой опоре, от единичного дисбаланса, установленного в точке ротора, имеющем координату  $z$ . Для пояснения метода рассмотрена балансировка в трёх плоскостях коррекции и соответственно рабочая зона ротора была разбита на три участка (рис. 3). Для каждого из участков вводим локальную систему координат  $z_1 (0 < z_1 < z_{1cp})$ ,  $z_2 (0 < z_2 < z_{2cp})$  и  $z_3 (0 < z_3 < z_{3cp})$ . Будем рассматривать не исходные характеристики ДКВ, которые могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, а их модули  $f_1(z) = |W_1(z)|$ ,  $f_2(z) = |W_2(z)|$ . В соответствии с вышесформулированным предположением функцию цели определим следующим образом:

$$\Phi(z_1, z_2, z_3) = f_{11}(z_1) + f_{21}(z_1) + f_{12}(z_2) + f_{22}(z_2) + f_{13}(z_3) + f_{23}(z_3) \equiv \max, \quad (1)$$

при ограничениях

$$0 \leq z_1 \leq z_{1гр}, \quad 0 \leq z_2 \leq z_{2гр}, \quad 0 \leq z_3 \leq z_{3гр}. \quad (2)$$

Первый индекс  $i$  функции  $f_{ij}$  означает номер опоры, второй  $j$  – номер участка.

Задача (1), (2) будет являться обычной задачей линейного программирования, если исходные характеристики ДКВ заменить ломаными линиями, как это показано на рис. 3.

#### ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрим ротор центробежного насоса ПЭ 250–180, разрез которого дан на рис.1.

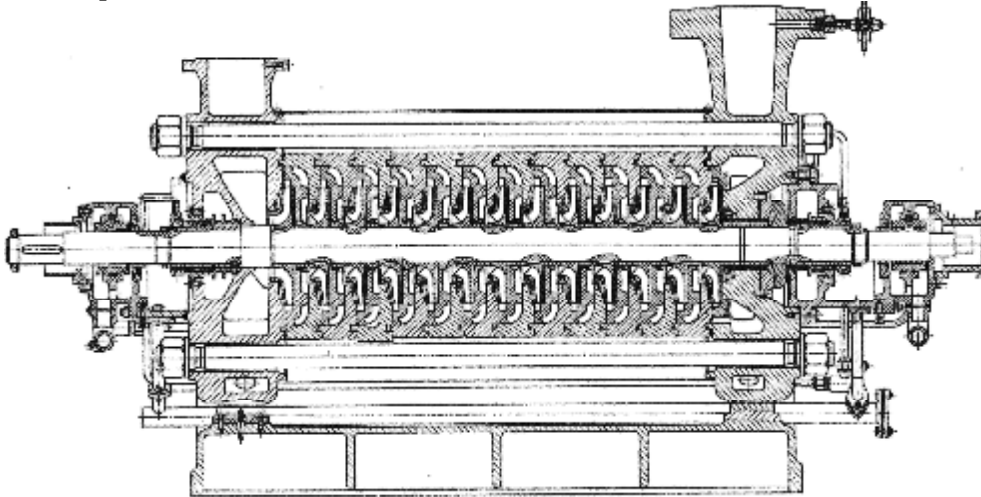


Рисунок 1 – Питательный насос ПЭ 250–180

Расчётная схема ротора приведена на рис.2.

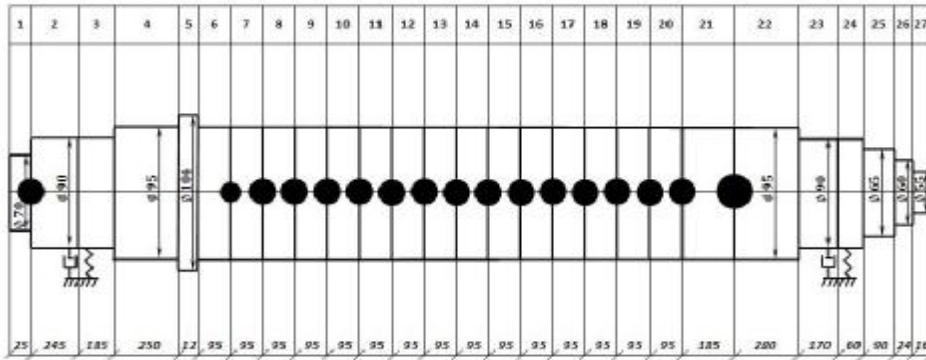


Рисунок 2 – Расчетная схема ротора

Предположим, что рабочая частота ротора равна  $\omega_p = 336c^{-1}$  и лежит между первой  $\omega_1 = 114c^{-1}$  и второй  $\omega_2 = 467c^{-1}$  критическими частотами.

Разобьём зону рабочих колёс на три участка (рис.3):  $0 < z_1 < z_{1гр}$ ,  $0 < z_2 < z_{2гр}$ ,  $0 < z_3 < z_{3гр}$ .

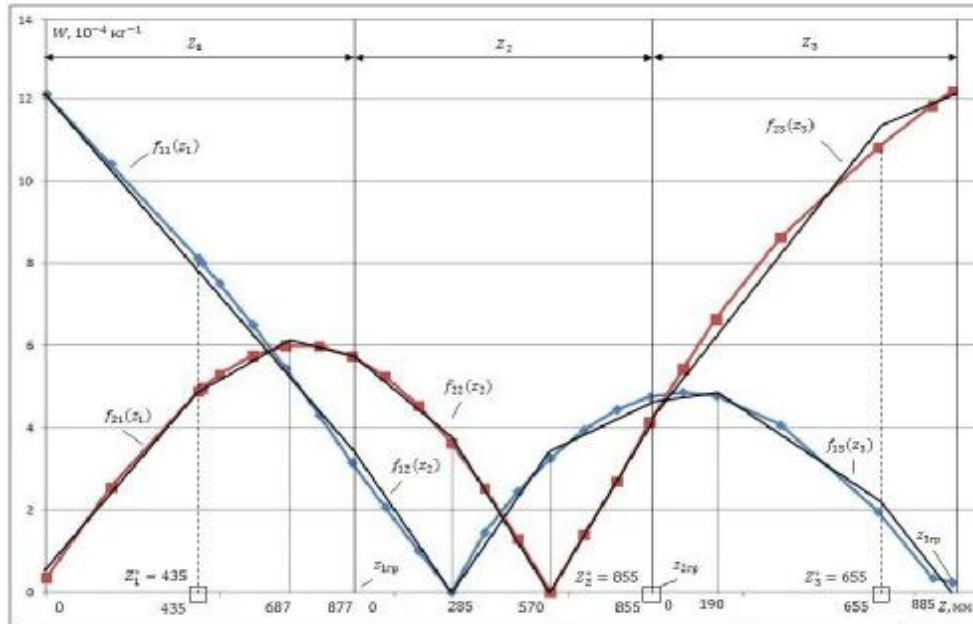


Рисунок 3 – Функции влияния на опорах ротора

Для каждого участка (локальная текущая координата  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  соответственно) запишем:

$$\begin{aligned}
 f_{11}(z_1) &= -10,124 \cdot 10^{-3} z_1 + 12,341, & 0 \leq z_1 < 877; \\
 f_{21}(z_1) &= \begin{cases} 10,354 \cdot 10^{-3} z_1 + 0,45, & 0 \leq z_1 < 435, \\ 4,487 \cdot 10^{-3} z_1 + 2,99, & 435 \leq z_1 < 687, ; \\ -1,368 \cdot 10^{-3} z_1 + 6,97, & 687 \leq z_1 < 877; \end{cases} \\
 f_{12}(z_2) &= \begin{cases} -11,06 \cdot 10^{-3} z_2 + 3,134, & 0 \leq z_2 < 285, \\ 11,35 \cdot 10^{-3} z_2 - 3,061, & 285 \leq z_2 < 570, ; \\ 5,24 \cdot 10^{-3} z_2 - 0,363, & 570 \leq z_2 < 855; \end{cases} \\
 f_{22}(z_2) &= \begin{cases} -7,41 \cdot 10^{-3} z_2 + 5,836, & 0 \leq z_2 < 285, \\ -12,72 \cdot 10^{-3} z_2 + 7,303, & 285 \leq z_2 < 570, ; \\ 14,55 \cdot 10^{-3} z_2 - 8,29, & 570 \leq z_2 < 855; \end{cases} \quad (3) \\
 f_{13}(z_3) &= \begin{cases} 0,1 \cdot 10^{-3} z_3 + 4,783, & 0 \leq z_3 < 190, \\ -6,16 \cdot 10^{-3} z_3 + 6,102, & 190 \leq z_3 < 655, ; \\ -7,93 \cdot 10^{-3} z_3 + 7,096, & 655 \leq z_3 < 885; \end{cases} \\
 f_{23}(z_3) &= \begin{cases} 10,11 \cdot 10^{-3} z_3 + 4,136, & 0 \leq z_3 < 655, \\ 5,9716 \cdot 10^{-3} z_3 + 6,903, & 655 \leq z_3 < 885. \end{cases}
 \end{aligned}$$

Эффективность предложенного способа проверена на ряде численных экспериментов, которые заключались в следующем. Ротор нагружался системой дисбалансов, обуславливающей как статическую, так и динамическую неуравновешенность (рис.2), при которой максимальный прогиб ротора составил 120 мкм, что существенно превышало допустимый  $[y] = 50 \text{ мкм}$ . Далее производилась на ПК виртуальная балансировка по программе, описанной в [3], в назначенных произвольно плоскостях коррекции на рабочих колёсах, соответствующих участкам расчётной системы № 13, 14, 17. Расчётным путём были сняты ДКВ (рис.3) и получены функции кусочно-линейной аппроксимации (3). В результате использования программы, реализующий симплекс-метод для задачи (1), (2), были получены оптимальные места плоскостей коррекции, соответствующие участкам № 5, 20, 24. Результаты виртуальных балансировок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты виртуальных балансировок

	До балансировки	После балансировки	
		Произвольные плоскости коррекций (участок № 13, 14, 17)	Оптимальные плоскости коррекций (участок № 5, 20, 24)
Максимальный прогиб ротора (мкм)	120	12.44	6.14
Величины дисбалансов (кг·мм)		12.0	11.7
		12.5	4.1
		22.8	10.1

Полученные данные наглядно иллюстрируют достигаемый эффект: максимальный прогиб при оптимальном расположении плоскостей оказался уменьшенным вдвое при значительном уменьшении дисбалансов (во второй плоскости втрое, в третьей – вдвое).

## SUMMARY

*The offered way of optimization of the locations of a balancing disbalance gives the chance to reach more effective decrease in level of vibrations at essentially smaller sizes of counterbalancing weights.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гадяка В.Г. Особенности практической балансировки роторов турбокомпрессорных агрегатов, основанные на экспериментальном уточнении их динамических моделей / В.Г. Гадяка, В.И. Симоновский // Проблемы машиностроения. – 2007. –Т.10, №1. – С.75–79.
2. Линейное и нелинейное программирование / И.Н. Лашенко, Е.А. Карагодова, Н.В. Черникова, Н.З. Шор. - Киев: Вища школа, 1975. – 732 с.
3. Симоновский В.И. Динамика роторов центробежных машин / В.И. Симоновский. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2006. – 126с.

*Поступила в редакцию 6 апреля 2010 г.*