

УДК 621.01

## ВОПРОСЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НА ДИНАМИКУ ДВУХМАССОВОЙ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ В ПЕРЕХОДНОМ И УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМАХ

© Исаак Наумович Статников, Георгий Игоревич Фирсов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения  
им. А.А. Благонравова РАН*

[instant@gmail.com](mailto:instant@gmail.com); [firsovgi@mail.ru](mailto:firsovgi@mail.ru)

***Аннотация.** В работе рассмотрены результаты проведенных вычислительных экспериментов по исследованию поведения двухмассовой виброударной системы в широком диапазоне изменения значений всех параметров системы как в исходной области варьирования параметров системы, так и в выделенной области концентрации наилучших решений по всем критериям качества.*

***Ключевые слова:** планирование вычислительных экспериментов; виброударная система; многокритериальный анализ, регрессионный анализ; дисперсионный анализ,*

В работе [1] представлена программа работ по исследованию поведения двухмассовой виброударной системы в широком диапазоне изменения значений всех параметров системы, за исключением величин зазоров  $\Delta_1, \Delta_2$ , методом планируемого вычислительного эксперимента (ВЭ) [2,3]. Ниже подробно рассмотрены результаты проведенных вычислительных экспериментов как в исходной области варьирования параметров системы  $G(\bar{\alpha})$ , так и в найденной области  $G_1(\bar{\alpha})$  концентрации наилучших решений по всем критериям качества.

Эксперимент 1.

В этом эксперименте область  $G(\bar{\alpha})$  изменения параметров задавалась соотношениями

$$\begin{cases} \alpha_1 \in (0,05;0,85); & \alpha_4 \in (0,05;0,85); & \alpha_7 \in (-1,7;1,7); \\ \alpha_2 \in (0,05;0,85); & \alpha_5 \in (0,05;0,85); & \alpha_8 \in (-1,7;1,7); \\ \alpha_3 \in (0,05;0,85); & \alpha_6 \in (0,05;0,85); & \alpha_9 \in (0,7;2,4). \end{cases} \quad (1)$$

в виде исходного гиперпараллелепипеда; во всех ВЭ  $\Delta_1 = \Delta_2$  и  $P_{1y} = P_{2y}$ . Число уровней  $M = 16$ , число серий  $T = 16$ , так что  $N_0 = M \times T = 256$ . Как уже отмечалось, при планировании ВЭ принималось  $\alpha_1 = \alpha_2$  и  $\alpha_7 = \alpha_8$ , так что общее число независимо варьировавшихся параметров в этом ВЭ равнялось семи. Сводные статистические характеристики по всем 12 критериям  $\Phi_j$  для эксперимента 1 представлены в табл. 1. Согласно табл. 1 для эксперимента 1 имеет место высокая вариативность численных значений для всех критериев в области (1), заключающаяся в сравнительно больших среднеквадратичных отклонениях величин критериев от их средних значений  $\bar{\Phi}_{k0}$ . Из данных этой таблицы следует, что практически «детерминированное» влияние оказывают значения  $\alpha_1$  (зазоры) на критерии  $\Phi_6(\bar{\alpha}), \dots, \Phi_{12}(\bar{\alpha})$ , ибо в соответствии с условием  $1 - \beta_1 < P < 1 - \beta_2$  для всех этих случаев  $P \geq 0,9999$ . Такое сильное (существенное) влияние зазора на указанные характеристики движения масс имеет вполне ясную физическую интерпретацию. Дело в том, что величины зазоров в значительной мере определяют кинематические характеристики движущегося объекта (скорость и перемещения). Тем самым определяется и их влияние на тангенциальные и нормальные составляющие скоростей удара.

Так как тангенциальные составляющие ударной скорости определяют начальные условия режима скольжения масс, а нормальные составляющие в значительной степени

влиять на длительность этого режима, то становится ясным факт статистического сильного влияния величины зазоров на характеристики режима скольжения масс.

Столь же ясную физическую интерпретация имеет и факт существенного влияния параметра  $\alpha_7$  ( $= \alpha_8$ ) почти на все критерии (при этом самый низкий уровень доверительной вероятности лишь для критерия  $\Phi_9(\bar{\alpha})$ :  $0,95 \leq P < 0,96$ ). Ведь  $\alpha_7, \alpha_8$  - это значения амплитуды силы возбуждения по одной из степеней свободы. Так же очевидно и влияние параметра  $\alpha_9$  (частоты силы возбуждения) на характеристики движения, причем, с высокой доверительной вероятностью: от  $0,995 \leq P \leq 0,9995$  до  $P > 0,9999$ . Несколько «смазанное» влияние параметров  $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_{86}$  на характеристики движения может быть объяснено тем, что значения зазоров для двух масс и амплитуды возбуждающих сил, приложенных к массам, брались в каждой точке  $\bar{\alpha}$  одинаковыми:  $\alpha_1 = \alpha_2$  и  $\alpha_7 = \alpha_8$ .

Степень статистического влияния параметров на критерии маскируется возможной корреляцией самих значений критериев (линейной или нелинейной). Сама же корреляция обуславливается как условиями проведения ВЭ (например, степенью независимости варьируемых параметров), так и реально существующей функциональной (детерминированной) связью между критериями; установление такой функциональной связи затруднительно вследствие невозможности получить в замкнутом виде аналитические решения исходной существенно нелинейной системы дифференциальных уравнений. С этой целью для всех групп ВЭ исчислялись коэффициенты  $r_{lk}$  и значения коэффициентов Стьюдента  $t_{lk}^2$ . Из анализа данных этих расчетов по обсуждаемой группе экспериментов, например, следует наличие тесной линейной связи между  $\Phi_1(\bar{\alpha})$  и  $\Phi_2(\bar{\alpha})$  ( $r_{12} = 0,639$ ) и между  $\Phi_4(\bar{\alpha})$  и  $\Phi_5(\bar{\alpha})$  ( $r_{45} = 0,699$ ). Причем, значения  $r_{lk}$  носят не случайный характер, поскольку соответствующим им значения критериев Стьюдента  $t_{12}^2 = 17,28 \geq t_{0,0001}$  и  $t_{45}^2 = 21,87 \geq t_{0,0001}$ .

Графическое представление результатов расчетов в совокупности с выводами дисперсионного анализа позволяет выделить подобласти  $G_k(\bar{\alpha})$  концентрации наилучших решений по каждому критерию  $\Phi_k(\bar{\alpha})$ . Ниже на рис. 1-3 показаны общие средние значения  $\bar{\Phi}_{k0}$  (горизонтальные линии) критериев и для каждого параметра  $\alpha_j$  построены графические зависимости  $\bar{\Phi}_{kij}(\alpha_j)$ , представляющие собой усредненные характеристики функций чувствительности критериев по параметрам. Чем больше число колебаний характеристики  $\bar{\Phi}_{kij}(\alpha_j)$  относительно своего среднего значения  $\bar{\Phi}_{k0}$ , тем ниже значение доверительной вероятности  $P$ , позволяющей устанавливать факт статистического влияния значений данного параметра на величины значений рассматриваемого критерия. Так на рис. 1 наблюдается большая колебательность функций  $\bar{\Phi}_{1i1}$  и  $\bar{\Phi}_{4i1}$  вокруг своих значений  $\bar{\Phi}_{10}$  и  $\bar{\Phi}_{40}$  соответственно. А по результатам расчетов этому соответствуют доверительные вероятности  $0,92 \leq P < 0,93$  и  $0,70 \leq P < 0,75$ , что и не позволяет говорить о существенном влиянии параметра  $\alpha_1$  на критерии  $\Phi_1(\bar{\alpha})$  и  $\Phi_4(\bar{\alpha})$  в области (1). В то же время на рис. 2,б наблюдаем ярко выраженный «в среднем» монотонный характер зависимостей  $\bar{\Phi}_{8i1}$ ,  $\bar{\Phi}_{10i1}$  и  $\bar{\Phi}_{11i1}$ . Но это и соответствует тому, что для всех трех случаев вероятность  $P \geq 0,9999$ .

Такая взаимосвязанность геометрического изображения функции  $\bar{\Phi}_{kij}(\alpha_j)$  и результатов дисперсионного анализа по параметру  $\alpha_j$  позволяет визуально определить области  $G_k(\alpha_j) \subseteq (\alpha_{j*}, \alpha_{j**})$  концентрации наилучших решений по  $k$ -му критерию. При этом для всех групп экспериментов руководствуемся следующим дихотомическим правилом: к подобласти  $G_k(\alpha_j)$  принадлежат все те значения  $\alpha_{ij}$ , в которых  $\bar{\Phi}_{kij}(\alpha_{ij}) \leq \bar{\Phi}_{k0}$ , если

критерий  $\Phi_k(\bar{\alpha})$  минимизируется, или, наоборот, все те значения  $\alpha_{ij}$ , в которых  $\bar{\Phi}_{kij}(\alpha_{ij}) \geq \bar{\Phi}_{k0}$ , если  $k$ -ый критерий максимизируется. Так, исходя из того, что все критерии качества моделируемой системы  $\Phi_1(\bar{\alpha}), \dots, \Phi_{12}(\bar{\alpha})$  следует минимизировать, на рис. 2,б выделены следующие подобласти

$$\begin{aligned} G_8(\alpha_1) &: 0,358 \leq \alpha_1 \leq 0,850; \\ G_{10}(\alpha_1) &: 0,338 \leq \alpha_1 \leq 0,850; \\ G_{11}(\alpha_1) &: 0,301 \leq \alpha_1 \leq 0,850. \end{aligned} \tag{2}$$

В данном примере очевидно, что из трех подобластей (2) следует выбрать  $G_8(\bar{\alpha})$ , т.к.  $G_8(\alpha_1) \subset G_{10}(\alpha_1) \subset G_{11}(\alpha_1) \subset (0,05; 0,85)$

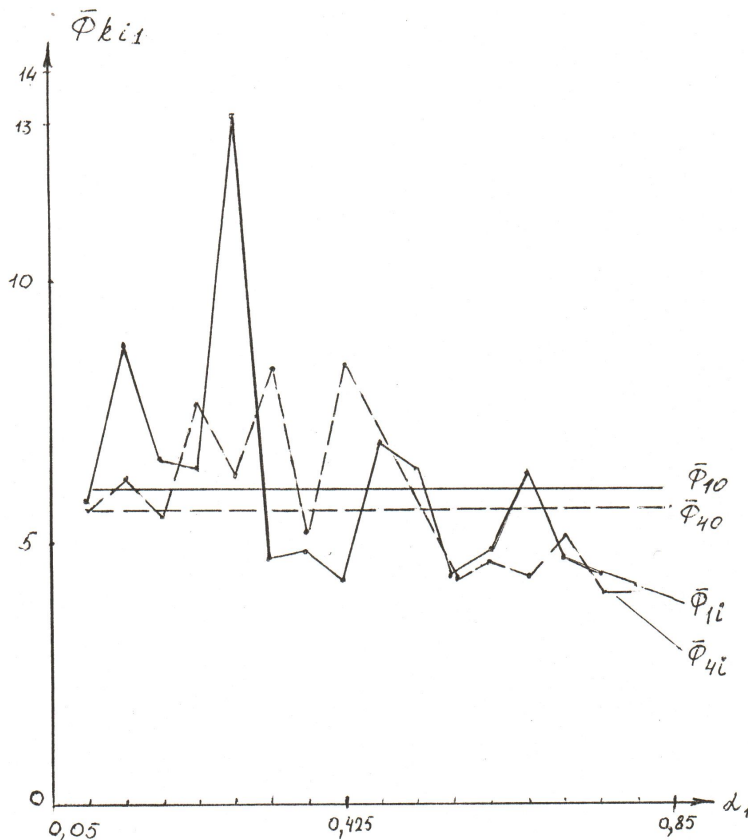


Рис. 1

По результатам анализа графического материала была выделена подобласть  $G_0(\bar{\alpha}) \subset G(\bar{\alpha})$  из (1), в которой одновременно концентрируются наилучшие решения по всем 12 критериям

$$\begin{aligned} 0,375 \leq \alpha_1 = \alpha_2 \leq 0,625; \quad 0,125 \leq \alpha_3 \leq 0,575; \quad 0,050 \leq \alpha_4 \leq 0,850; \quad 0,050 \leq \alpha_5 \leq 0,525; \\ 0,050 \leq \alpha_6 \leq 0,525; \quad -0,320 \leq \alpha_7 = \alpha_8 \leq 0,532; \quad 1,5 \leq \alpha_9 \leq 2,4. \end{aligned} \tag{3}$$

Заметим, что отношение объема области (3) к объему области (1) составляет 0,822%.

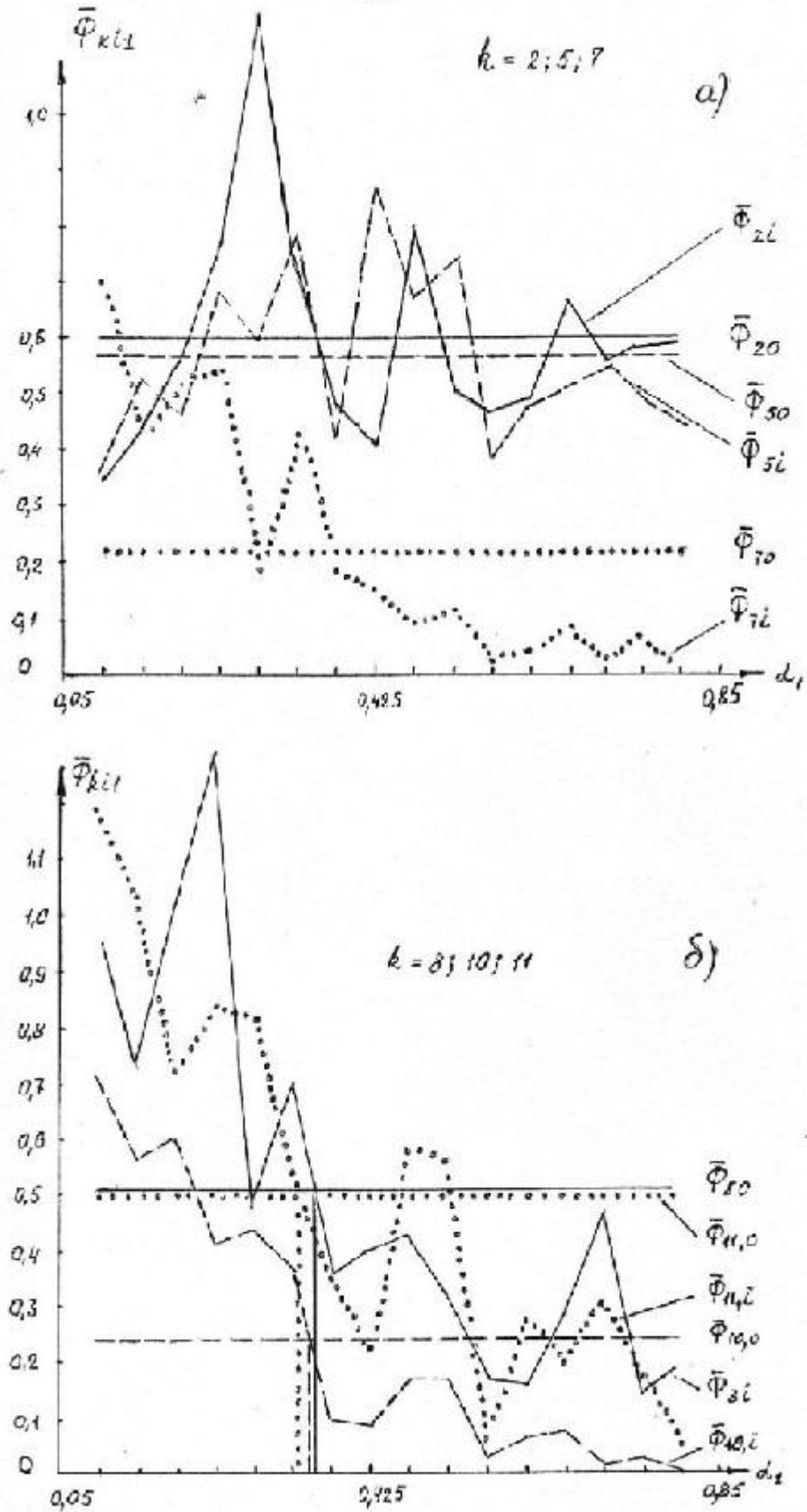


Рис. 2

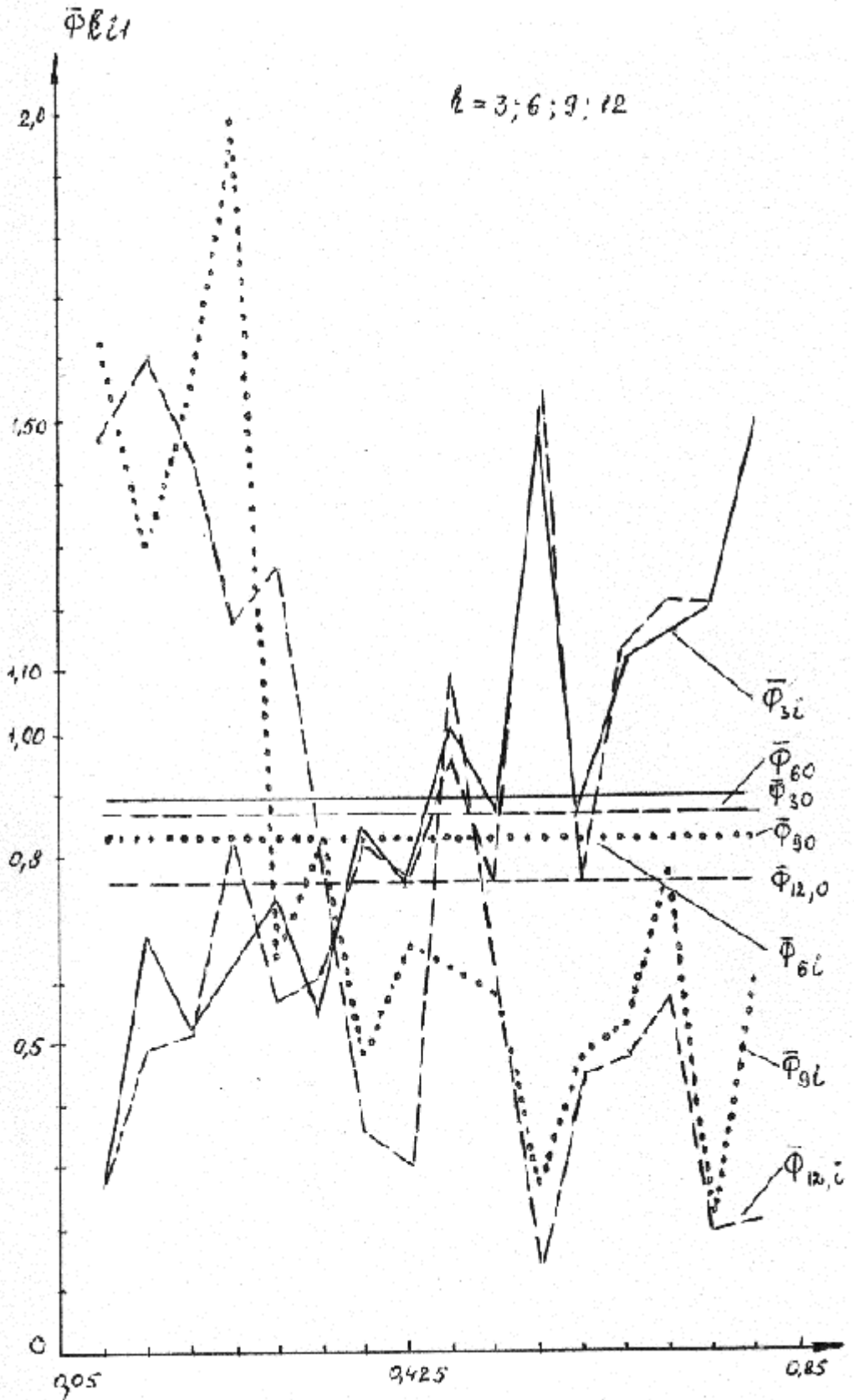


Рис. 3

Таблица 1

Сводные статистические характеристики для первой группы ВЭ

| Характеристики                          | Номер критерия |        |       |       |       |       |       |
|---|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1              | 2      | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
| Среднее значение                        | 6,046          | 0,599  | 0,897 | 5,750 | 0,565 | 0,872 | 0,222 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 7,536          | 0,842  | 0,881 | 6,645 | 0,734 | 0,880 | 0,326 |
| Минимальное значение                    | 0              | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Максимальное значение                   | 102            | 10,277 | 4,575 | 65,7  | 7,908 | 4,570 | 1,001 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 125            | 141    | 98    | 116   | 130   | 101   | 147   |
| Характеристики                          | Номер критерия |        |       |       |       |       |       |
|   | 8              | 9      | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| Среднее значение                        | 0,508          | 0,829  | 0,240 | 0,495 | 0,759 | 0,328 | 0,319 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 0,717          | 1,095  | 0,349 | 0,674 | 0,975 | 0,817 | 0,543 |
| Минимальное значение                    | 0              | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Максимальное значение                   | 3,583          | 3,583  | 1,001 | 3,343 | 4,255 | 7,683 | 4,082 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 141            | 132    | 145   | 136   | 128   | 249   | 170   |

Таблица 2

Сводные статистические характеристики для второй группы ВЭ

| Характеристики                          | Номер критерия |       |       |       |       |       |
|---|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1              | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| Среднее значение                        | 3,003          | 0,348 | 0,789 | 2,906 | 0,360 | 0,804 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 1,515          | 0,289 | 0,376 | 1,115 | 0,183 | 0,350 |
| Минимальное значение                    | 1,200          | 0,050 | 0,381 | 1,000 | 0,048 | 0,204 |
| Максимальное значение                   | 3,700          | 2,022 | 2,048 | 6,400 | 1,385 | 2,068 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 50,4           | 83,0  | 47,6  | 38,4  | 50,8  | 43,6  |
| Характеристики                          | Номер критерия |       |       |       |       |       |
|   | 7              | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| Среднее значение                        | 0,009          | 0,119 | 0,122 | 0,010 | 0,090 | 0,139 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 0,041          | 0,353 | 0,359 | 0,055 | 0,267 | 0,363 |
| Минимальное значение                    | 0              | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Максимальное значение                   | 0,297          | 2,134 | 1,909 | 0,437 | 1,532 | 1,502 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 448            | 297   | 287   | 546   | 297   | 261   |

Сводные статистические характеристики для третьей группы ВЭ

| Характеристики                          | Номер критерия |       |       |       |       |       |
|---|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1              | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| Среднее значение                        | 4,506          | 0,430 | 1,172 | 5,152 | 0,528 | 1,235 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 2,594          | 0,318 | 0,960 | 2,659 | 0,449 | 0,916 |
| Минимальное значение                    | 0              | 0     | 0     | 1,8   | 0,080 | 0,338 |
| Максимальное значение                   | 14,2           | 1,457 | 4,079 | 14,7  | 2,296 | 4,085 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 57,5           | 74    | 82    | 51,6  | 85    | 74,2  |
| Характеристики                          | Номер критерия |       |       |       |       |       |
|   | 7              | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| Среднее значение                        | 0,038          | 0,242 | 0,302 | 0,038 | 0,273 | 0,475 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 0,142          | 0,539 | 0,753 | 0,080 | 0,547 | 0,975 |
| Минимальное значение                    | 0              | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Максимальное значение                   | 1              | 2,831 | 4,053 | 0,329 | 2,607 | 4,515 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 373            | 223   | 249   | 213   | 200   | 205   |

Таблица 4

Сводные статистические характеристики для четвертой группы ВЭ

| Характеристики                          | Номер критерия |       |       |       |       |       |
|---|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1              | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| Среднее значение                        | 4,469          | 0,449 | 1,149 | 4,783 | 0,510 | 1,171 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 2,474          | 0,421 | 0,946 | 2,554 | 0,336 | 0,896 |
| Минимальное значение                    | 0              | 0     | 0     | 1     | 0,069 | 0,357 |
| Максимальное значение                   | 12             | 2,759 | 4,048 | 12,2  | 1,520 | 3,641 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 55,4           | 94    | 82,2  | 53,4  | 65,8  | 76,5  |
| Характеристики                          | Номер критерия |       |       |       |       |       |
|   | 7              | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| Среднее значение                        | 0,053          | 0,268 | 0,387 | 0,036 | 0,225 | 0,376 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 0,157          | 0,619 | 0,919 | 0,093 | 0,449 | 0,763 |
| Минимальное значение                    | 0              | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Максимальное значение                   | 1              | 3,072 | 4,364 | 0,535 | 2,191 | 3,472 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 296            | 231   | 237   | 260   | 200   | 203   |



Сводные статистические характеристики для пятой группы ВЭ

| Характеристики                          | Номер критерия |       |       |       |       |       |       |       |
|---|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1              | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| Среднее значение                        | 4,772          | 0,596 | 0,841 | 5,222 | 0,577 | 0,978 | 0,259 | 0,578 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 3,389          | 0,562 | 0,720 | 3,814 | 0,655 | 0,948 | 0,370 | 0,700 |
| Минимальное значение                    | 0              | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Максимальное значение                   | 14             | 2,560 | 3,802 | 28,2  | 5,633 | 4,764 | 1     | 3,584 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 71             | 94    | 85,6  | 73    | 113,6 | 97    | 143   | 121   |
| Характеристики                          | Номер критерия |       |       |       |       |       |       |       |
|   | 9              | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| Среднее значение                        | 0,878          | 0,222 | 0,561 | 0,753 | 1,151 | 1,285 | 0,264 | 0,212 |
| Среднеквадратическое отклонение         | 1,100          | 0,347 | 0,778 | 1,044 | 0,875 | 1,059 | 0,462 | 0,519 |
| Минимальное значение                    | 0              | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Максимальное значение                   | 4,260          | 1     | 4,539 | 5,241 | 3,832 | 5,676 | 2,630 | 4,529 |
| Вариативность (изменчивость) выборки, % | 125            | 156   | 139   | 139   | 74,4  | 82    | 175   | 245   |

Эксперимент 1а.

В выделенной области (3) были проведены ВЭ со следующей МПЭ:  $T = 8$  и  $M_j = 8$ , всего  $N_0 = 64$ . Сводные статистические характеристики по результатам ВЭ представлены в табл. П.2. Из данных табл. 2 следует вывод об общем существенном улучшении (в смысле минимизации) всех количественных оценок по 12 критериям качества. Такой результат объясняется тем, что при выделении области (3) были существенно сужены диапазоны варьирования основных параметров возбуждения  $\alpha_7$ ,  $\alpha_8$  и  $\alpha_9$ , т.е. исключены точки с большими отношениями амплитуд возбуждения по координатам  $x$  и  $y$ , а также интервал частот в окрестности первого резонанса упругой системы.

Этот вывод подтверждается и данными дисперсионного анализа, которые свидетельствуют, что параметры  $\alpha_7$  и  $\alpha_8$  оказывают существенное влияние в среднем на всю совокупность критериев. При этом в области (3) нет существенного в линейном приближении влияния геометрических параметров упругих пар (зазоров и эксцентриситетов) на величины критериев. Для дальнейшего уточнения влияния этих параметров на рассматриваемые критерии необходимы повторные ВЭ в увеличенном объеме, в основном, за счет увеличения числа уровней каждого варьлируемого параметра.

Эксперимент 1б.

Область проведения ВЭ была сформирована посредством расширения области (3) за счет того, что диапазоны изменения параметров  $\alpha_7$ ,  $\alpha_8$  и  $\alpha_9$  были увеличены до прежних, соответствующих области (1):



$$\alpha_1 = \alpha_2 \in [0, 375; 0, 625]; \alpha_3 \in [0, 125; 0, 575]; \alpha_4 \in [0, 05; 0, 85]; \alpha_5 \in [0, 05; 0, 525];$$

$$\alpha_6 \in [0, 05; 0, 525]; \alpha_7 = \alpha_8 \in [-1, 7; 1, 7]; \alpha_9 \in (0, 7; 2, 4).$$

(4)

В каждом из этих ВЭ сохранялось условие  $\alpha_1 = \alpha_2$  и  $\alpha_7 = \alpha_8$ . Сводные статистические характеристики результатов проведенных ВЭ представлены в табл. 3. Параметры МПЭ:  $N_0 = 64$ ,  $T = 8$  и  $M_j = 8$ . Отношение объема области (4) к объему области (1) составляет 6,2%. Результаты табл. 3 несколько уступают аналогичным из табл. П.2, но все равно лучше по значениям характеристик из табл. 1. Данные дисперсионного анализа показали, что в этих экспериментах снова возросло влияние зазора, по-прежнему существенна роль параметров источника возбуждения.

#### Эксперимент 1в.

В этом случае область варьирования параметров была по-прежнему взята в соответствии с (3.9), но величина второго зазор является независимо варьируемым параметром. Сводные статистические характеристики результатов ВЭ отражены в табл. 4. Параметры МПЭ:  $N_0 = 64$ ,  $T = 8$  и  $M_j = 8$ . Из данных табл. 4 видно, что средние значения всех характеристик близки к соответствующим величинам из предыдущих экспериментов (1б), хотя и несколько лучше. Картина распределения влияний параметров в среднем на значения критериев качества примерно такая же, как и в эксперименте 1б.

#### Эксперимент 1г.

В этой группе ВЭ варьировалось 8 параметров, при этом:  $\alpha_1 = \alpha_2$  в каждом эксперименте. МПЭ была размеров ( $N_0 \times J$ ), где:  $N_0 = 128$ ,  $J = 8$ ,  $M_j = 8$  и  $T = 16$ . Исходная область была та же, что и в (1), при этом параметр  $\alpha_8$  варьировался независимо от  $\alpha_7$  в тех же пределах:  $\alpha_8 \in (-1,7; 1,7)$ . В этом эксперименте были введены дополнительные статистические характеристики движения масс:

$\Phi_{13}(\bar{\alpha})$  - средняя накопленная величина модуля ударной скорости первой массы в единицу времени;

$\Phi_{14}(\bar{\alpha})$  - средняя накопленная величина ударной скорости второй массы

$\Phi_{15}(\bar{\alpha})$  и  $\Phi_{16}(\bar{\alpha})$  – средняя величина работы силы трения при скольжении первой и второй массы по ограничителю, соответственно.

Сводные статистические характеристики представлены в табл. 5. Сравнение результатов дисперсионного анализа в экспериментах 1б и 1г (в обоих случаях  $\Delta_1 = \Delta_2$ ) показывает, что учет неодинаковости двух амплитуд гармонического возбуждения делает еще более наглядным влияние зазоров на характеристики движения. При этом четко прослеживается симметричное влияние параметров  $\alpha_7$  и  $\alpha_8$  на средние значения модулей ударных скоростей:  $\alpha_7$  - на  $\Phi_{13}(\bar{\alpha})$  и  $\alpha_8$  - на  $\Phi_{14}(\bar{\alpha})$ . Значения статистических характеристик из табл. 5 меньше (лучше) соответствующих характеристик из табл. 1. При этом четко видна тесная корреляционная связь между  $\Phi_2(\bar{\alpha})$ ,  $\Phi_3(\bar{\alpha})$  и  $\Phi_{13}(\bar{\alpha})$  для первой ударной пары, и между  $\Phi_5(\bar{\alpha})$ ,  $\Phi_6(\bar{\alpha})$  и  $\Phi_{14}(\bar{\alpha})$  для второй ударной пары ( $|r_{2,13}| = 0,745$ ,  $|r_{3,13}| = 0,893$  и соответственно  $t_{2,12}^3 = 18,94$  и  $t_{3,13}^3 = 49,88$  - для первой ударной пары;  $|r_{5,14}| = 0,614$ ,  $|r_{6,14}| = 0,841$  и соответственно  $t_{5,14}^3 = 11,15$  и  $t_{6,14}^3 = 32,51$  - для второй ударной пары).

### Литература

1. Статников И.Н., Фирсов Г.И. О планировании вычислительных экспериментов в задачах динамики двухмассовой виброударной системы // Вестник научно-технического развития. – 2012. - № 6(58). - С.27-33.

2. Статников И.Н., Андреенков Е.В. ПЛП-поиск - эвристический метод решения задач математического программирования. - М.: Изд-во МГУДТ, 2006. - 140 с.

3. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Эвристические возможности ПЛП-поиска при проектировании динамических систем // Обозрение прикладной и промышленной математики. - 2008. - Т.15, вып. 3. - С.930-931.

*Поступила: 29.09.12.*