

УДК 621.92.01

Н.В. Лищенко, к.т.н.

Одесская национальная академия пищевых технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Описано умови та наведено результати багатofакторного планування експерименту, що дозволяє встановити вплив режимів фрезерування на величину вібрацій, які вимірюють за допомогою вібродатчиків і звукового датчика.

Ключові слова: вібрація, датчик віброускорення, мікрофон вимірювальний, інформаційний сигнал.

Описаны условия и приведены результаты многофакторного планирования эксперимента, позволяет установить влияние режимов фрезерования на величину вибраций, которые измеряют с помощью вибродатчиков и звукового датчика.

Ключевые слова: вибрация, датчик виброускорення, микрофон измерительный, информационный сигнал.

The conditions and results of multivariate experimental design, which allows to establish the effect of cutting the amount of modes of vibration, which is measured by means of vibration sensors and sound sensor.

Keywords: vibration, acceleration sensor, microphone measurement, the information signal.

Проблема вібрацій в технологічних системах різання являється актуальною в зв'язі з впливом вібрацій на технологічні показателі обробки. К числу актуальних задач відноситься дослідження впливу режимів фрезерування на параметри віброколивальних, наприклад, віброускорення, з наступним встановленням зв'язи цих параметрів з технологічними показателями (шорхуватістю, волнистістю і т.п.). При проведенні віброакустичних досліджень використані датчики віброускорення типу AP 2019 і измерительний мікрофон SPL Lab USB RTA meter. Указанні датчики віброускорення можна розположити в підсистемі шпинделя, наприклад, на неподвижному торці шпиндельного узла (рис.1) або в підсистемі заготовки.

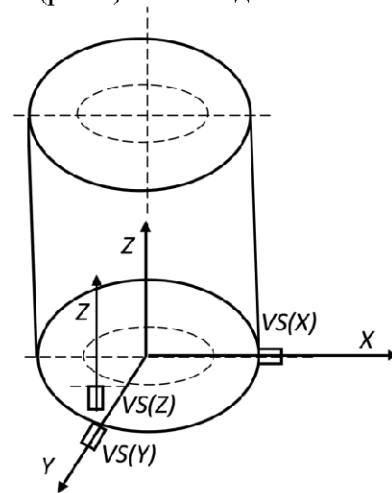


Рис. 1. Схема установки датчиков віброускорення AP 2019 і її реалізація на оброблюваному центрі мод. 500V/5.

Измерительная система для проведения эксперимента выполнена на основе программно-аппаратного измерительного комплекса фирмы National Instruments: NI-DAQ max (аппаратная часть) и NI-LabVIEW (программная часть).

В качестве образцов для фрезерования использованы призматические заготовки 70x50x20 мм из стали Ст.3. Противоположные боковые плоские грани этих образцов последовательно фрезеровали концевой фрезой Ø18 мм из быстрорежущей стали P6M5. Образцы закрепляли в станочных тисках таким образом, чтобы была возможность установить датчик AP 2019 на заготовку по оси x станка.

Методика факторного планирования эксперимента содержит следующие этапы [1].

1. Выбор структуры уравнения регрессии – математической модели изучаемого объекта.

2. Составление плана эксперимента, позволяющего определить коэффициенты уравнения регрессии, а также провести необходимую статистическую обработку данных.
3. Регрессионный анализ (анализ уравнения регрессии).
 - 3.1. Проверка однородности дисперсий по G – критерию Кохрана (Cochran's C – test).
 - 3.2. Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента (Student's t – test).
 - 3.3. Оценка адекватности полученной математической модели по F – критерию Фишера (F – test).

Для двухфакторного эксперимента при фрезеровании зависимости для определения вибро- и звукового сигнала, могут быть представлены в виде [2]

$$VA = C_1 \cdot t^x \cdot S_z^y, \quad (1)$$

$$VA = C_1 \cdot t^x \cdot n^y, \quad (2)$$

где t – глубина фрезерования, мм; S_z – подача на зуб, мм/зуб; n – частота вращения фрезы, мин^{-1} ; C_1, x, y – коэффициенты.

Выражения (1) и (2) необходимо преобразовать к линейному виду, например, путем логарифмирования [2].

Получим

$$\ln VA = \ln C + x \ln t + y \ln S_z. \quad (3)$$

$$\ln VA = \ln C + x \ln t + y \ln n. \quad (4)$$

Обозначим через x_p ($p = 1, 2$) факторы линейных моделей (3), (4).

В уравнении (3) обозначено $\ln t = x_1$, $\ln S_z = x_2$. В уравнении (4): $\ln t = x_1$, $\ln n = x_2$.

Уровнями варьирования каждого фактора x_p ($p = 1, 2$) в кодовом выражении являются два числа: +1 (максимальное значение фактора) и -1 (минимальное значение фактора). Все экспериментальные точки плана расположены симметрично относительно центра, который характеризуется уровнем 0 в кодовом выражении [3].

Безразмерные (закодированные) параметры x_1, x_2 (далее x_j при $j = 1, 2$) связаны с соответствующими натуральными переменными \tilde{x}_1, \tilde{x}_2 (далее \tilde{x}_j при $j = 1, 2$) следующим уравнением [2]

$$x_j = \frac{2(\ln \tilde{x}_j - \ln \tilde{x}_j \max)}{\ln \tilde{x}_j \max - \ln \tilde{x}_j \min} + 1, \quad (5)$$

где x_j, \tilde{x}_j – рассматриваемые параметры в безразмерной и размерной формах, соответственно.

Функция отклика \hat{Y} может быть представлена в виде [2]

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (6)$$

где x_1, x_2 – факторы, которые варьируются и рассчитываются по уравнению (5); b_0, b_1, b_2, b_{12} – постоянные коэффициенты;

С учетом выражения (5) зависимость (6) принимает следующий вид

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & b_0 + b_1 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_1 - \ln \tilde{x}_{1 \max})}{(\ln \tilde{x}_{1 \max} - \ln \tilde{x}_{1 \min})} + 1 \right] + b_2 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_2 - \ln \tilde{x}_{2 \max})}{(\ln \tilde{x}_{2 \max} - \ln \tilde{x}_{2 \min})} + 1 \right] + \\ & + b_{12} \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_1 - \ln \tilde{x}_{1 \max})}{(\ln \tilde{x}_{1 \max} - \ln \tilde{x}_{1 \min})} + 1 \right] \times \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_2 - \ln \tilde{x}_{2 \max})}{(\ln \tilde{x}_{2 \max} - \ln \tilde{x}_{2 \min})} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

где $\ln \tilde{x}_i, \ln \tilde{x}_{i \max}, \ln \tilde{x}_{i \min}$ – логарифмы от натурального значения, соответственно, текущего, максимального и минимального значений переменной \tilde{x}_i ($i = 1, 2$).

Коэффициенты уравнения регрессии для случая $N = 4$

$$b_0 = \frac{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}; \quad b_1 = \frac{-\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}; \quad b_2 = \frac{-\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}; \quad b_{12} = \frac{+\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}.$$

Проведены два двухфакторных эксперимента (табл.1).

Характеристика факторных экспериментов

Математическая модель	
планируемая	полученная
Первый эксперимент (влияние t и S_z)	
$VA(S) = f_{VA(S)}(t, S_z)$	$VA(S) = e^{-2,5034}$
$VA(P) = f_{VA(P)}(t, S_z)$	$VA(P) = e^{-1,95401} \cdot t^{0,2568}$
$SS = f_{SS}(t, S_z)$	$SS = e^{1,02627} \cdot t^{0,53577} \cdot S_z^{0,54587}$
Второй эксперимент (влияние t и n)	
$VA(S) = f_{VA(S)}(t, n)$	$VA(S) = e^{-13,24712} \cdot t^{(-13,0967+1,9635 \ln n)} \cdot n^{1,59235}$
$VA(P) = f_{VA(P)}(t, n)$	$VA(P) = e^{-11,0755} \cdot t^{(-7,454+1,125931 \ln n)} \cdot n^{1,334}$
$SS = f_{SS}(t, n)$	$SS = e^{-9,60151} \cdot t^{(-5,6188+0,9071 \ln n)} \cdot n^{1,3966}$
Примечание: 1. $VA(S)$ и $VA(P)$ – информационные вибросигналы при установке вибродатчика на шпинделе и заготовке; SS – информационный звуковой сигнал от микрофона. 2. $f_{VA(S)}$, $f_{VA(P)}$, f_{SS} – функциональные зависимости, соответствующие указанным выше информационным сигналам.	

Рассмотрим пример получения математической модели $SS = f_{SS}(t, n)$ в соответствии с методикой многофакторного планирования [3].

Матрица планирования эксперимента для $N = 4$ (табл. 2) содержит результаты измерений информационного сигнала от звукового датчика (микрофона).

Таблица 2

Номер серии опытов	$x_1(t)$	$x_2(n)$	y_1 , отн.ед.	y_2 , отн. ед.	Y_1	Y_2	\bar{Y}	$(Y - \bar{Y})$
1	-1	-1	0,6096	0,6785	-0,4949	-0,38787	-0,44141	-0,05354
2	-1	+1	2,1097	1,649	0,7465	0,5	0,62325	0,12325
3	+1	-1	0,9864	0,9639	-0,0137	-0,03677	-0,02522	0,011547
4	+1	+1	6,76	6,76	1,911	1,911	1,911	0

Примечание:

1. Y_i ($i = 1, 2$) – измеренное значение функции отклика (звукового сигнала) в относит. единицах.

2. $Y_1 = \ln y_1$; $Y_2 = \ln y_2$; $\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2}{2}$;

Знаки “+”, и “-”, соответствуют максимальному и минимальному значениям факторов, которые варьируются.

3. $x_1(t)$, $x_2(n)$ – значения безразмерных факторов x_1 и x_2 , характеризующих (в закодированном виде) глубину фрезерования t , частоту вращения фрезы n .

Выбираем численные значения верхнего и нижнего уровня варьируемых факторов (табл. 2) и заносим результаты измерений звуковых информационных сигналов в табл.3

Таблица 3

\tilde{x}_1	\tilde{x}_2
t , мм	n , мин ⁻¹
	\tilde{x}_{jmin}
0,5	950
	$\ln \tilde{x}_{jmin}$
-0,6931	6,85646
	\tilde{x}_{jmax}
1	3800
	$\ln \tilde{x}_{jmax}$
0	8,24275

Коэффициенты уравнения регрессии: $b_0=0,5169$; $b_1=0,42598$; $b_2=0,75022$; $b_{12}=0,21789$.

Для проверки гипотезы об однородности дисперсий для $n_u = \text{const}$ (число параллельных опытов в u -й серии, $u = 1 \dots N$) используется G -критерий Кохрена. Если $n_u = \text{const}$, то значение этого критерия можно определить по формуле

$$G = \frac{S_u^2 \max}{\sum_{u=1}^N S_u^2} < G_{\text{табл}}, \quad (8)$$

где S_u^2 – дисперсия для каждой u -й серии опытов ($u = 1, 2, \dots, N$); $S_{u\max}^2$ – максимальное значение дисперсии для данных наблюдений.

Дисперсию и среднее значение результатов наблюдений \bar{Y}_u для u -го опыта определяют из следующих зависимостей (табл.4)

$$S_u^2 = \frac{\sum_{l=1}^{n_u} (Y_{ul} - \bar{Y}_u)^2}{n_u - 1}, \quad \bar{Y}_u = \frac{\sum_{l=1}^{n_u} Y_{ul}}{n_u},$$

где Y_{ul} – l -ое значение функции отклика Y в строке u ; l – переменная, принимающая значение от 1 до количества повторений одного и того же опыта; \bar{Y}_u – среднее значение экспериментальных данных для u -й серии опытов.

Если $G < G_{\text{табл}}$ при выбранном уровне значимости α , заданном общем числе серий опытов N и числе степеней свободы $f = n - 1$, то гипотеза однородности дисперсий принимается. При нарушении данного неравенства гипотеза отвергается.

Таблица 4

u	$2(Y - \bar{Y})^2$
1	0,00573
2	0,03038
3	0,00027
4	0

Значение G -критерия Кохрена можно определить по формуле (8), т.е.

$$G = \frac{0,03038}{0,03638} = 0,835.$$

Табличное значение критерия Кохрена составляет $G_{\text{табл}} = 0,907$ ($N = 4, f = 1$).

Так как $G < G_{\text{табл}}$ ($0,835 < 0,907$), то гипотеза однородности дисперсий принимается.

Выполним оценку значимости коэффициентов уравнения регрессии по t -критерию Стьюдента.

Вычислим дисперсию, характеризующую ошибку опыта

$$S_{\text{ош}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_u^2}{N}, \quad (9)$$

Получим

$$S_{\text{ош}}^2 = \frac{0,03638}{4} = 0,009095.$$

Среднеквадратичную ошибку определяют по формуле

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_{\text{ош}}^2}{Nn} \quad (10)$$

Т.е. $S_{b_1}^2 = \frac{0,009095}{4 \cdot 2} = 0,001137$. Следовательно, $S_{b_1} = 0,0337$.

Доверительный интервал для всех коэффициентов регрессии находим по формуле

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{b_i} = \pm \frac{t S_{ош}}{\sqrt{Nn}}, \quad (11)$$

Табличное значение критерия Стьюдента составляет $t=2,776$.

Следовательно, $\Delta b_i = \pm 2,776 \cdot 0,0337 = \pm 0,09355$.

Получим $b_0=0,5169 > 0,09355$; $b_1=0,42598 > 0,09355$; $b_2=0,75022 > 0,09355$; $b_{12}=0,21789 > 0,09355$.

Следовательно, коэффициенты b_0, b_1, b_2 и b_{12} являются значимыми.

Преобразовываем выражение (7), подставляя граничные значения $\ln \tilde{x}_{i_{max}}, \ln \tilde{x}_{i_{min}}$ (табл.3) и найденные коэффициенты уравнения регрессии.

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= 0,5169 + 0,42598 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_1 - 0)}{(0 + 0,6931)} + 1 \right] + \\ &+ 0,75022 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_2 - 8,24275)}{(8,24275 - 6,85646)} + 1 \right] + \\ &+ 0,21789 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_1 - 0)}{(0 + 0,6931)} + 1 \right] \times \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_2 - 8,24275)}{(8,24275 - 6,85646)} + 1 \right] = \\ &= -9,60151 + \ln \tilde{x}_1 (-5,6188 + 0,9070 \ln \tilde{x}_2) + 1,3966 \ln \tilde{x}_2 \end{aligned} \quad (12)$$

После потенцирования выражения (12) получаем зависимость между звуковым информационным сигналом и режимными параметрами фрезерования

$$SS = e^{-9,60151} \cdot t^{(-5,6188 + 0,9071 \ln n)} \cdot n^{1,3966}.$$

Выполним оценку адекватности полученной математической модели по F – критерию Фишера.

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{ош}^2}, \quad (13)$$

Здесь

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^M n_u (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{N - K}, \quad (14)$$

где K – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Определим дисперсии ошибки для оценки адекватности модели (табл. 5).

Таблица 5

u	\hat{Y}	$(\hat{Y} - \bar{Y})$	$(\hat{Y} - \bar{Y})^2$	$2(\hat{Y} - \bar{Y})^2$
1	-0,44141	0	0	0
2	0,62325	0	0	0
3	-0,02523	-0,00001	$1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$
4	1,91099	-0,00001	$1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$

Определим численные значения функции отклика в точках плана. Получим

$$\hat{Y}_1 = 0,5169 + 0,42598 \cdot (-1) + 0,75022 \cdot (-1) + 0,21789 \cdot (+1) = -0,44141;$$

$$\hat{Y}_2 = 0,5169 + 0,42598 \cdot (-1) + 0,75022 \cdot (+1) + 0,21789 \cdot (-1) = 0,62325;$$

$$\hat{Y}_3 = 0,5169 + 0,42598 \cdot (+1) + 0,75022 \cdot (-1) + 0,21789 \cdot (-1) = -0,02523;$$

$$\hat{Y}_4 = 0,5169 + 0,42598 \cdot (+1) + 0,75022 \cdot (+1) + 0,21789 \cdot (+1) = 1,91099.$$

$$\text{Следовательно, } S_{ad}^2 = \frac{4 \cdot 10^{-10}}{4 - 2} = 2 \cdot 10^{-10}, \quad F = \frac{2 \cdot 10^{-10}}{0,009095} = 219,9 \cdot 10^{-10}.$$

$$F_{ТАБЛ} = 6,94 \quad \text{при уровне значимости } \alpha = 0,05 \quad \text{и} \quad f_{ош} = N(n-1) = 4 \cdot (2-1) = 4.$$

$f_1 = N - K = 4 - 2 = 2$. Т. к. $F < F_{ТАБЛ}$ ($219,9 \cdot 10^{-10} < 6,944$), то модель адекватна.

Зависимости $VA(S) = f_{VA(S)}(t, n)$ и $SS = f_{SS}(t, n)$ представим графически (рис. 2).

Выводы:

1. Из таблицы 1 видно, что информационный сигнал вибродатчика, установленного на шпиндельном узле не зависит от глубины фрезерования и подачи на зуб при постоянной частоте вращения.
2. Информационный сигнал вибродатчика, установленного на заготовке, не зависит от подачи на зуб при постоянной частоте вращения. В то же время информационный сигнал звукового датчика зависит и от глубины фрезерования, и от подачи на зуб.
3. Информационные сигналы звукового датчика и вибродатчиков, установленных на шпинделе и заготовке, при постоянной подаче на зуб зависят от глубины фрезерования и частоты вращения фрезы.
4. Информационные сигналы от звукового датчика (микрофон) и вибродатчика, например, установленного на заготовке, аналогичны по характеру изменения (рис.2).

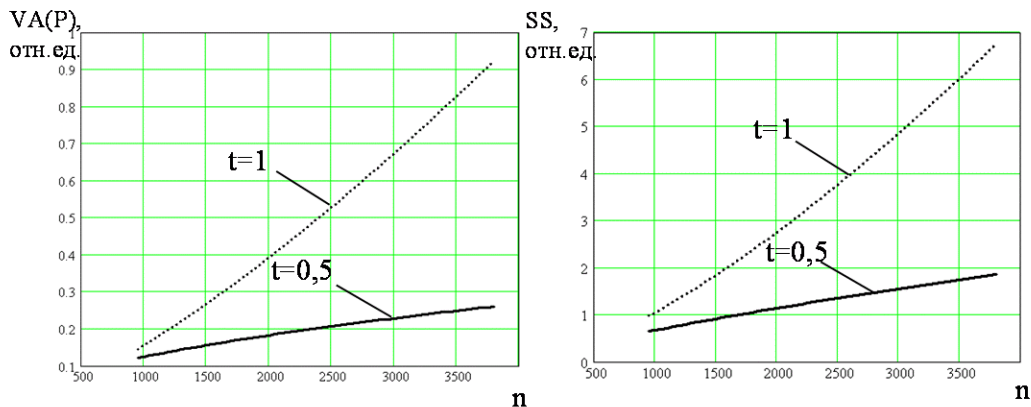


Рис. 2. Зависимость информационного сигнала виброускорения (вибродатчик на детали) и звукового сигнала (микрофон) от частоты вращения фрезы при указанных глубинах фрезерования.

5. С увеличением частоты вращения от 950 до 3800 мин⁻¹ информационные сигналы, характеризующие виброускорение и звуковой сигнал увеличиваются (рис.2).
6. С увеличением глубины резания от 0,5 мм до 1 мм информационные сигналы, характеризующие виброускорение и звуковой сигнал, увеличиваются.
7. Установлено, что изменять уровень вибросигнала и звукового сигнала наиболее эффективно за счет изменения частоты вращения фрезы.

Информационные источники

1. Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. — М.: Наука, 1987.— 320 с.
2. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента.— М.: Машиностроение, 1974.— 240 с.
3. Дупинский В.В. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / В.В. Дупинский, Е.С. Пуховский, С.Г. Радченко Под общ. ред. к.т.н. Г.Э. Таурита.— К.: Техніка, 1977.— 176 с. УДК 621.822

УДК 621.822

Ю.А. Лук'яничук, к.т.н., А.А. Корпусов, О.А. Лукашук
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ РОЛІКІВ ПІДШИПНИКІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЇХ ОБРОБЛЕННЯ

У роботі проведено порівняння експериментального дослідження оброблення поверхні кочення роликів підшипників та моделювання цього процесу за допомогою програмного забезпечення, яке дозволить прогнозувати значення мікрогеометрії поверхонь оброблення, що призведе до підвищення продуктивності праці та швидкого виявлення неполадок у разі їх виникнення.

Ключові слова: безцентрове шліфування, роликів підшипник, шорсткість, мікрогеометрія, моделювання.