

УДК 62-752.34

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Гаврилин А.Н.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск,
e-mail: tom-gawral@list.ru

Настоящая статья посвящена вопросам решения задач повышения виброустойчивости технологической системы при механической обработке посредством моделирования динамических процессов на примере фрезерования. За основу выбрана технологическая система на базе вертикально-фрезерного станка. Составлена расчетная схема технологической системы, ее математическая модель (система дифференциальных уравнений), описывающая поведение системы при механообработке. По параметрам, приближенным к реальным, проведено моделирование, позволившее построить амплитудно-частотные характеристики и спектрограммы. По результатам теоретических исследований и экспериментальных, полученных ранее, проведено сравнение спектра колебаний заготовки на позволивших сделать вывод об адекватности составленной модели. Таким образом, математическая модель может с точностью, достаточной для инженерных расчетов, применяться для проведения исследований динамики работы технологической системы с целью назначения режимов резания в зонах, исключающих возможность появления резонанса.

Ключевые слова: механическая обработка, вибрация технологической системы, виброустойчивость, методы повышения виброустойчивости, моделирование процессов при механической обработке

SIMULATION OF THE DYNAMIC PROCESSES DURING MECHANICAL TOOLING

Gavrilin A.N.

National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: tom-gawral@list.ru

It is regarded at the present article how to solve the problem of vibrostability increasing of the technological system by means of the dynamic processes simulation during mechanical tooling using milling as an example. The technological system based on a vertical milling machine is chosen as a basis. The analytical model and its mathematical model (differential equation system) describing the behavior of the technological system is developed. The simulation was performed accordingly to the almost actual parameters which allowed to build up the spectral record of amplitude and frequency performance diagram. According to the theoretical and empirical research results obtained earlier, the matching of amplitude of the workpiece oscillation on the spindle rotation speed of 1500 Rev/min is made. This research allows to make a conclusion about the adequacy of the models. Thus, the mathematical model can with accuracy of sufficient for engineering analysis be used for the dynamics of the technological system research with the aim of choosing the cutting mode in the zones, excluding the possibility resonance occurrence.

Keywords: mechanical tooling, vibration of technology system, vibrostability, method for vibrostability improving, simulation of the processes during mechanical tooling

Одна из основных тенденций развития машиностроения – это постоянное увеличение производительности механической обработки деталей и повышение точности и качества обработки. При этом для получения высокой производительности применяется высокоскоростное резание, которое как правило сопровождается проявлениями резонанса в элементах технологической системы (ТС) [1–6, 9, 11]. Работа в условиях резонанса не только интенсифицирует износ инструмента, сокращает долговечность элементов системы СПИД, но и приводит к увеличению брака, а также снижению точности и качества обработки. При этом обнаружение частотных зон, в которых вероятно выявление резонансных зон в ТС, весьма затруднено без применения специального оборудования [5, 6].

Рассматриваемый в данной работе подход основан на предварительном моделировании процессов, происходящих в ТС (рис. 1) при обработке заготовки, в результате чего строятся спектральные характеристики элементов ТС, позволяющие опре-

делить частотные участки с повышенным уровнем вибрации, тем самым назначить при реальной обработке оптимальные с точки зрения минимального уровня вибрации режимы обработки.

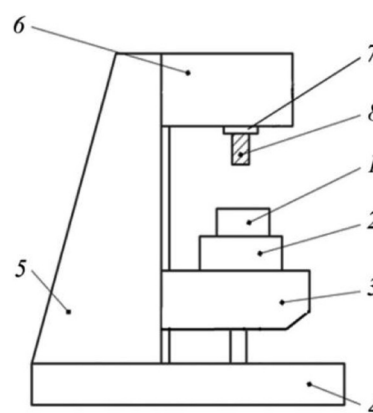


Рис. 1. Компановка ТС: 1 – заготовка; 2 – приспособление; 3 – консольный стол; 4 – основание; 5 – стойка; 6 – шпиндельная бабка; 7 – шпиндель; 8 – инструмент

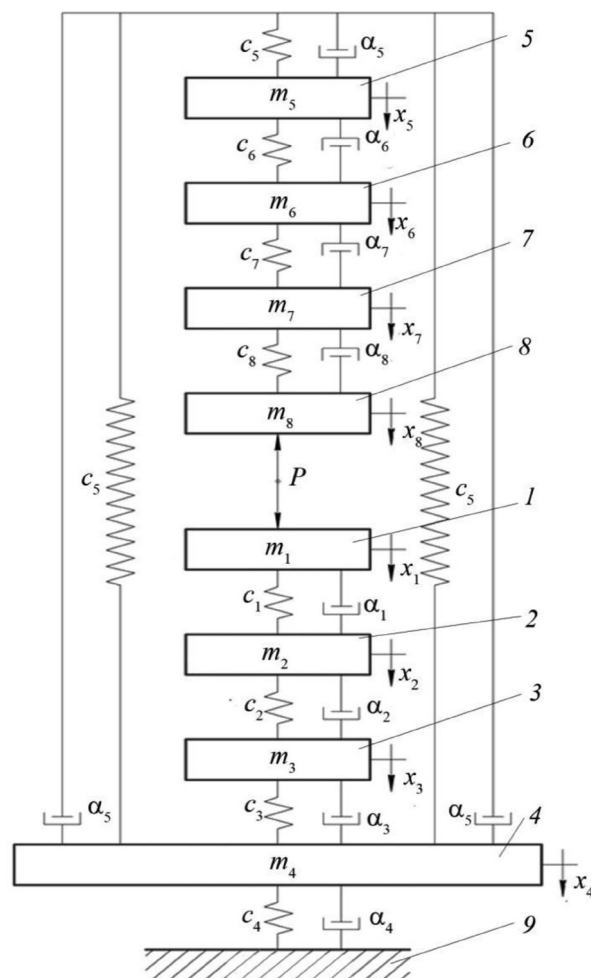


Рис. 2. Расчетная схема ТС: 1–9 – блоки динамической системы;
1 – заготовка; 2 – приспособление; 3 – консольный стол; 4 – основание; 5 – стойка;
6 – фрезерная бабка; 7 – шпиндель; 8 – инструмент; 9 – фундамент

Рассмотрим динамический процесс, возникающий при фрезеровании (рис. 1). ТС представлена в виде дискретной упруго-массовой системы (рис. 2), элементы которой описываются массой, коэффициентами жесткости и демпфирования [7].

По расчетной схеме ТС (рис. 2) составляется система дифференциальных уравнений (1), решение которой велось методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Обозначения в системе дифференциальных уравнений:

- P – вертикальная нагрузка, (Н). При моделировании принят гармонический закон изменения возмущающей силы $P = P_z + P_{0z} \cdot \sin(z \cdot \omega \cdot t)$;
- P_{0z} – амплитудное значение возмущающей силы, имитирующей вертикальную проекцию силы резания (Н);
- P_z – постоянная составляющая вертикальной нагрузки, (Н);
- z – число зубьев фрезы;

- ω (f) – угловая частота (частота), рад/с (Гц);
- t – время, (с);
- m_{1-8} – массы (кг) элементов ТС (рис. 1);
- $x_{1-8}, \dot{x}_{1-8}, \ddot{x}_{1-8}$ – соответствующие узлам (рис. 1, 2) виброперемещения, виброскорости и виброускорения;
- c_{1-8}, α_{1-8} – соответствующие (рис. 1, 2) узлам коэффициенты жесткости и упругого демпфирования.

Допущение о гармоническом законе действия силы резания принято в данной работе из соображения выявления реакции элементов ТС на такое воздействие, а также факта, что форма сигнала $P(t)$ при спектральном преобразовании будет иметь основную гармонику на указанной частоте $\omega = z \cdot \omega_z$.

Система линейных неоднородных дифференциальных уравнений:

$$m_1 \ddot{x}_1 + \alpha_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1 (x_1 - x_2) = P;$$

$$\begin{aligned}
 m_2 \ddot{x}_2 - \alpha_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \alpha_2 (x_2 - x_3) - c_1 (x_1 - x_2) + c_2 (x_2 - x_3) &= 0; \\
 m_3 \ddot{x}_3 - \alpha_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + \alpha_3 (x_3 - x_4) - c_2 (x_2 - x_3) + c_3 (x_3 - x_4) &= 0; \\
 m_4 \ddot{x}_4 - \alpha_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + \alpha_4 \dot{x}_4 - c_3 (x_3 - x_4) + c_4 x_4 - c_5 (x_4 - x_5) - \alpha_5 (\dot{x}_4 - \dot{x}_5) &= 0; \\
 m_5 \ddot{x}_5 - \alpha_5 (\dot{x}_4 - \dot{x}_5) + \alpha_6 (\dot{x}_5 - \dot{x}_6) - c_5 (x_4 - x_5) + c_6 (x_5 - x_6) &= 0; \\
 m_6 \ddot{x}_6 - \alpha_6 (\dot{x}_5 - \dot{x}_6) + \alpha_7 (\dot{x}_6 - \dot{x}_7) - c_6 (x_5 - x_6) + c_7 (x_6 - x_7) &= 0; \\
 m_7 \ddot{x}_7 - \alpha_7 (\dot{x}_6 - \dot{x}_7) + \alpha_8 (\dot{x}_7 - \dot{x}_8) - c_7 (x_6 - x_7) + c_8 (x_7 - x_8) &= 0; \\
 -m_8 \ddot{x}_8 + \alpha_8 (\dot{x}_7 - \dot{x}_8) + c_8 (x_7 - x_8) &= P.
 \end{aligned}$$

Значения параметров математической модели

Масса, Н·с ² /м	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8
	4	8	50	220	250	100	35	0,2
Кoeffициент жесткость, 10 ⁶ Н/м	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
	35	40	45	50	60	80	100	15
Кoeffициент демпфирования, Н с/м	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
	80	100	300	120	100	100	100	70
Амплитудное значение силы, Н	P_{0z}							
	400							

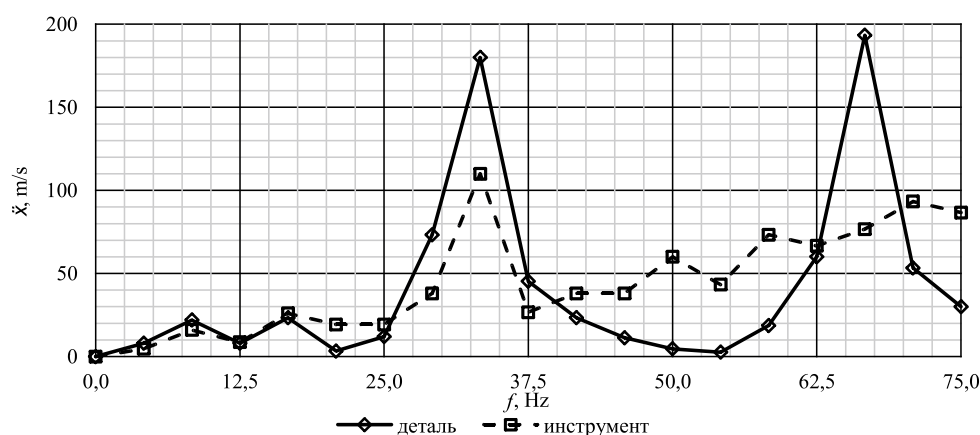


Рис. 3. АЧХ вибросигнала

Значения параметров, вошедших в математическую модель, представлены в таблице. Значения жесткости приняты, опираясь на материалы [8].

По результатам моделирования получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) элементов ТС (рис. 3).

По результатам (рис. 4) можно выделить две зоны с минимальными значениями уровня вибросигнала:

- в диапазоне от 0 до 25 Гц;
- в диапазоне от 37,5 до 62,5 Гц,

которые можно рекомендовать при назначении режимов технологического процесса, и резонансные частоты, которых следует избегать.

Для сравнения адекватности модели проведено сравнение результатов теоретических (моделирование) и экспериментальных исследований [12] по уровню вибросигнала на заготовке на частоте 25 Гц (рис. 4). Следует отметить, что значения коэффициентов (таблица) при моделировании приняты согласно значениям реальной ТС.

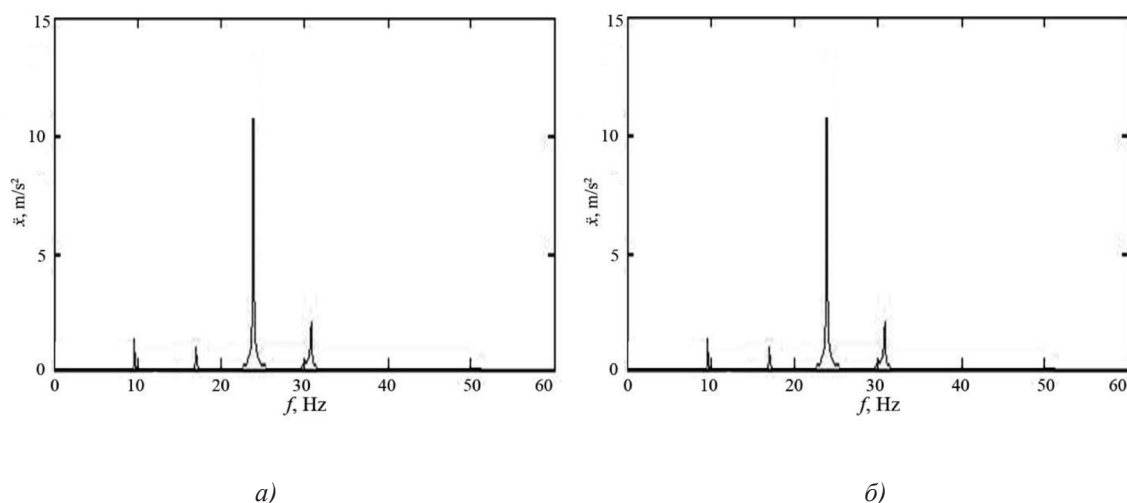


Рис. 4. Спектр вибросигнала на заготовке при частоте вращения шпинделя 24 Гц
а – теоретические исследования; б – эксперимент, 1–4 – номер зуба фрезы

Уровень вибросигнала по результатам теоретических и практических исследований, соответственно, $10,9 \text{ м/с}^2$ и $8,8 \text{ м/с}^2$. Таким образом, относительная погрешность исследований составила 19,3%. Различие результатов теоретических и экспериментальных исследований объясняется тем, что при моделировании:

- принято гармоническое воздействие вместо полигармонического;
- не учитывалась нелинейность реальной ТС.

Таким образом, рассмотренная математическая модель может с достаточной для инженерных расчетов точностью [10] применяться для проведения исследований поведения работающей ТС посредством моделирования процессов, происходящих в ней.

Работа выполнена при поддержке Фонда В. Потанина, исследовательский проект № GK140000513.

Список литературы

1. Андреев В.Н., Боровский Г.В., Боровский В.Г., Григорьев С.Н. Инструмент для высокопроизводительного и экологически чистого резания. – М.: Машиностроение, 2010. – 479 с.
2. Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Качан А.В. Опыт изготовления лопаток модели турбокомпрессора с повышенной точностью в условиях опытного производства // САПР и графика. – 2009. – № 3. – С. 80–82.
3. Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Качарава И.Н., Леонтьев А.Е. Расчетно-экспериментальная оценка рациональных технологических параметров высокопроизводительной фрезерной обработки в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства аэродинамических моделей самолетов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4 (2). – С. 374–379.

4. Гаврилин А.Н. Метод снижения уровня вибраций при механической обработке // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 11. – С. 23–26.

5. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Метод оперативной диагностики металлорежущего станка для обработки заготовок типа тел вращения // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 9. – С. 81–84.

6. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б., Черкасов А.И. Конструктивные методы повышения виброустойчивости металлорежущего оборудования // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 82–87.

7. Григорьев Н.В. Вибрация энергетических машин. – Л: Машиностроение, 1974. – 464 с.

8. Диагностика технологических систем. Часть 1: учебное пособие / А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 120 с.

9. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – М.: Машиностроение, 1986. – 180 с.

10. Основы применения ЭВМ в химической технологии: Учеб. пособие / Н.А. Самойлов. – Уфа: Уфим. нефт. ин-т., 1988. – 92 с.

11. Свидет. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2009613214 РФ. Программный комплекс сбора, обработки и анализа вибрационных сигналов nkRecorder / Н.А. Кочинев, Ф.С. Сабиров, М.П. Козочкин. – ОБПБТ № 4 (69), 2009. – 6 с.

12. A.N. Gavrilin, B.B. Moyzes, A.I. Cherkasov. Research Methods of Milling Technology Elements, J. Applied Mechanics and Materials. 756 (2015) P. 35–40.

References

1. Andreev V.N., Borovskij G.V., Borovskij V.G., Grigoriev S.N. Instrument dlia vysokoproizvoditelnogo i jekologicheski chistogo rezanija. M.: Mashinostroenie, 2010. 479 p.
2. Bolsunovskij S.A., Vermel V.D., Gubanov G.A. Kazhan A.V. Opyt izgotovlenija lopatok modeli turbokompressora s povyshennoj tochnostju v uslovijah opytnogo proizvodstva // SAPR i grafika. 2009. no. 3. pp. 80–82.
3. Bolsunovskij S.A., Vermel V.D., Gubanov G.A., Kacharava I.N., Leontev A.E. Raschetno-jekspperimentalnaja ocenka racionalnyh tehnologicheskikh parametrov vysokoproizvoditelnoj frezernoj obrabotki v sostave avtomatizirovannoj sistemy

tehnologicheskoj podgotovki proizvodstva ajerodinamicheskikh modelej samoletov // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 14, no. 4 (2). pp. 374–379.

4. Gavrilin A.N. Metod snizhenija urovnja vibracij pri mehanicheskoj obrabotke // Kontrol. Diagnostika. 2013. no. 11. pp. 23–26.

5. Gavrilin A.N., Mojzes B.B. Metod operativnoj diagnostiki metallovezhushhego stanka dlja obrabotki zagotovok tipa tel vrashhenija // Kontrol. Diagnostika. 2013. no. 9. pp. 81–84.

6. Gavrilin A.N., Mojzes B.B., Cherkasov A.I. Konstrukтивnye metody povyshenija vibroustojchivosti metallovezhushhego oborudovanija // Kontrol. Diagnostika. 2013. no. 13. pp. 82–87.

7. Grigorev N.V. Vibracija jenergeticheskikh mashin. L.: Mashinostroenie, 1974. 464 p.

8. Diagnostika tehnologicheskikh sistem. Chast 1: uchebnoe posobie / A.N. Gavrilin, B.B. Mojzes; Tomskij politehnicheskij universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2013. 120 p.

9. Zharkov I.G. Vibracii pri obrabotke lezviynym instrumentom. – M.: Mashinostroenie, 1986. 180 p.

10. Osnovy primenenija JeVM v himicheskoj tehnologii: Ucheb. posobie / N.A. Samojlov. Ufa: Ufim. nef. in-t., 1988. 92 p.

11. Svidet. o gos. reg. programmy dlja JeVM no. 2009613214 RF. Programmyj kompleks sbora, obrabotki i analiza vibracionnyh signalov nkRecorder / N.A. Kochinev, F.S. Sabirov, M.P. Kozochkin. OBPBT no. 4 (69), 2009. 6 p.

12. A.N. Gavrilin, B.B. Moyzes, A.I. Cherkasov. Research Methods of Milling Technology Elements, J. Applied Mechanics and Materials. 756 (2015) pp. 35–40.

Рецензенты:

Нижегородов А.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой строительных, дорожных машин и гидравлических систем, ФГБОУ ВПО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск;

Крауиньш П.Я., д.т.н., профессор кафедры автоматизации и роботизации в машиностроении, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.