

АНАЛИЗ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РОТОРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Базанова А.П., Крюков В.А.

Тульский государственный университет, Тула

Ключевые слова: динамика, автоматические роторные линии, нагрузочные графики, спектральный анализ.

Аннотация. В статье описываются возможности снижения уровня колебаний в многопоточных передачах. На примере типовых нагрузочных графиков штамповочных операций, используемых в автоматических роторных линиях, выполнен спектральный анализ. Показано, что для большинства штамповочных операций при разложении в ряд Фурье достаточно учитывать первые три гармоники.

ANALYSIS OF POWER CHARACTERISTICS OF TECHNOLOGICAL ROTORS FOR PRESSURE TREATMENT

Bazanova A.P., Krukov V.A.

Tula State University, Tula

Keywords: dynamics, automatic rotary lines, load graphs, spectral analysis.

Abstract. The article describes the possibilities of reducing the level of oscillation level in multithreaded transmissions. Spectral analysis is performed on the example of typical load schedules of stamping operations used in automatic rotary lines. It is shown that for most stamping operations, when decomposing into a Fourier series, it is sufficient to take into account the first three harmonics.

Исследование динамических процессов является одним из наиболее важных этапов при проектировании современных машин. При этом решаются две взаимосвязанные задачи [1, 2]. Первая задача – динамический анализ – позволяет оценить динамические нагрузки на элементы машины, необходимые для дальнейшего расчета деталей машины на прочность и жесткость, получить исходные данные для расчета вибраций, уровня шума и решения ряда других задач. Основной целью второй задачи – динамического синтеза – для машин циклового действия является снижения уровня колебаний в машине до заданного уровня.

Машинный агрегат, в общем случае, представляет собой механическую систему, которую можно описать матричным операторным уравнением

$$\mathbf{X}(p) = \mathbf{W}(p) \cdot \mathbf{F}(p),$$

где $\mathbf{X}(p)$ – матрица-столбец изображений выходных координат, параметров, характеризующих динамическое состояние системы; $\mathbf{W}(p)$ – матрица изображений передаточных функций, характеризующих саму систему и зависящих только от параметров системы; $\mathbf{F}(p)$ – матрица-столбец изображений обобщенных сил, характеризующих силовое воздействие на систему. Основное влияние на динамику технологических машин оказывают движущие силы и силы полезного сопротивления (технологические силы). Соответственно с этим

матрицу-столбец изображений обобщенных сил можно представить в виде суммы

$$\mathbf{F}(p) = \mathbf{F}_{\text{дв}}(p) + \mathbf{F}_{\text{тс}}(p),$$

где $\mathbf{F}_{\text{дв}}$ – матрица-столбец изображений движущих сил; $\mathbf{F}_{\text{тс}}(p)$ – матрица-столбец изображений технологических сил.

Основной причиной колебаний в технологических машинах циклового действия, к которым относятся автоматические роторные линии для обработки давлением, являются периодические изменения сил технологического сопротивления. Автоматические роторные линии используют принцип многопоточности при передаче энергии от источников к потребителям. Многопоточность в таких машинах достигается за счет расположения нескольких позиций на роторе и использования нескольких последовательно расположенных роторов [3]. Если в качестве первого приближения при построении расчетной схемы считать все звенья передаточных механизмов абсолютно жесткими, то суммарный момент сил полезного сопротивления можно представить в виде,

$$M_{\text{тс}}(\varphi) = \sum_{i=1}^n M_i(\varphi), \quad (1)$$

который и будет являться обобщенной силой полезного сопротивления. Здесь $M_i(\varphi)$ – момент технологических сил на i -ом технологическом роторе; n – число технологических роторов; φ – угол поворота ротора. Передаточные функции приводов рабочих движения в технологических роторах на участке выполнения технологических операций близки к линейным [3], поэтому (1) можно преобразовать к виду

$$M_{\text{тс}}(\varphi) = K \sum_{i=1}^n P_i(\varphi), \quad (2)$$

где $K = \text{const}$ – передаточная функция привода рабочих движения на участке выполнения технологических операций; $P_i(\varphi)$ – технологические силы.

Функции $P_i(\varphi)$ являются периодическими с одним и тем же периодом, что и создает предпосылки для снижения колебаний в приводе. Теоретические основы такого подхода к уменьшению уровня колебаний в машине рассмотрены в [4, 5]. Первым необходимым этапом для решения этой задачи является представление суммарного момента сил полезного сопротивления в виде суммы гармонических функций, т.е. в виде ряда Фурье. Реализация этого этапа на примере типовых нагрузочных графиков для штамповочных операций и рассмотрена в данной статье.

Большинство сил технологического сопротивления штамповочных операций, выполняемых на автоматических роторных линиях можно аппроксимировать с помощью трех типовых графиков (рис. 1) [6]. На рисунке обозначено: φ – текущий угол поворота ротора; P – технологическое усилие; P_{max} – максимальная технологическая сила; $\varphi_{\text{р}}$ – рабочий цикл; $\varphi_{\text{т}}$ – технологический цикл; φ_1 φ_2 – углы, определяемые на основе конкретной технологической операции.

Подробно разберем решение поставленной задачи на примере графика 1. В аналитической форме этот график можно описать функцией

$$P(\varphi) = \begin{cases} P_{\max} \frac{\varphi}{\varphi_1} & \text{при } 0 \leq \varphi < \varphi_1; \\ P_{\max} & \text{при } \varphi_1 \leq \varphi < \varphi_T - \varphi_2; \\ P_{\max} \frac{\varphi_T - \varphi}{\varphi_1} & \text{при } \varphi_T - \varphi_2 \leq \varphi < \varphi_T; \\ 0 & \text{при } \varphi_T \leq \varphi < \varphi_P. \end{cases}$$

Период функции $P(\varphi)$ равен рабочему циклу φ_P . Периодическую функцию $P(\varphi)$ можно разложить в ряд Фурье [7]

$$P(\varphi) = b_0 + \sum_{k=1}^n [a_k \cdot \sin(k\omega\varphi) + b_k \cdot \cos(k\omega\varphi)], \quad (3)$$

где частота $\omega = 2\pi / \varphi_P$.

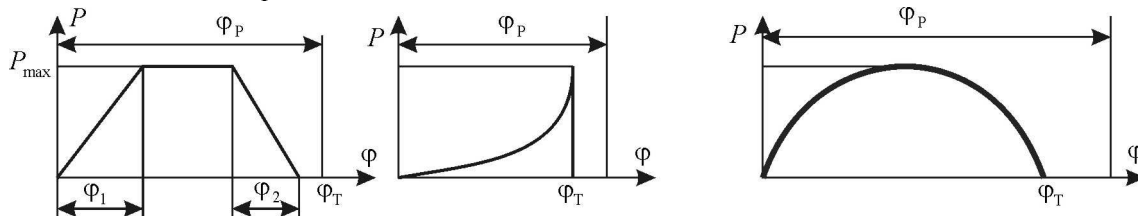


Рис. 1. Типовые нагрузочные графики

Коэффициенты ряда Фурье определяются известными зависимостями:

$$b_0 = \varphi_P^{-1} \int_0^{\varphi_P} P(\varphi) d\varphi;$$

$$a_k = 2\varphi_P^{-1} \int_0^{\varphi_P} P(\varphi) \sin(k\omega\varphi) d\varphi;$$

$$b_k = 2\varphi_P^{-1} \int_0^{\varphi_P} P(\varphi) \cos(k\omega\varphi) d\varphi.$$

Коэффициент b_0 представляет собой среднее значение силы технологического сопротивления.

Выполняя интегрирование функции (3), получим

$$a_k = \frac{P_{\max}}{2} \cdot \frac{\lambda_2 \sin(2\pi k \lambda_1) - \lambda_1 \{ \sin[\pi k (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)] + \lambda_1 \sin[\pi k (\lambda_2 - \lambda_1 - \lambda_3)] \}}{\pi^2 k^2 \lambda_1 \lambda_2};$$

$$b_k = P_{\max} \cdot \frac{-\lambda_2 \sin(\pi k \lambda_1)^2 + \lambda_1 \sin[\pi k (\lambda_1 + \lambda_3)] \sin(\pi k \lambda_2)}{\pi^2 k^2 \lambda_1 \lambda_2}; \quad b_0 = P_{\max} \frac{\lambda_3}{2},$$

где относительные коэффициенты:

$$\lambda_1 = \frac{\varphi_1}{\varphi_P}; \quad \lambda_2 = \frac{\varphi_2}{\varphi_P}; \quad \lambda_3 = \frac{2\varphi_T - (\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_P}.$$

Для построения амплитудного спектра определяем амплитуду колебаний силы на k -ой гармонике,

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}. \quad (4)$$

В качестве примера на рисунке 2 показан амплитудный спектр, построенный для операции вытяжки при следующих исходных данных: $P_{\max} = 26000 \text{ Н}$; $\varphi_1 = 11,25^\circ$; $\varphi_2 = 9^\circ$; $\varphi_T = 36^\circ$; $\varphi_P = 45^\circ$.

Отсюда видно, что амплитуды колебаний на третьей и высших гармониках незначительны, и при проведении динамического анализа ими можно пренебречь.

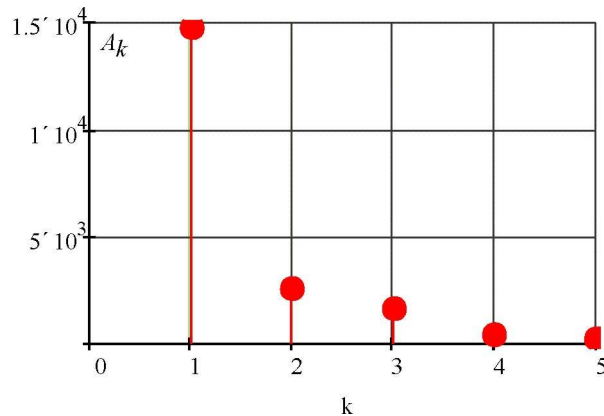


Рис. 2. Амплитудный спектр

На распределение амплитуд гармоник колебаний влияют многие факторы. Наибольшее влияние оказывает соотношение рабочего и технологического циклов. Для оценки этого влияния введем дополнительный коэффициент $\lambda = \varphi_T / \varphi_P$. Тогда $\lambda_3 = 2\lambda - \lambda_1 - \lambda_2$. Так как изменение коэффициента λ приведет к изменению среднего значения силы технологического сопротивления, то для оценки уровня колебаний используем коэффициент неравномерности силы, равный отношению амплитуды колебаний на k -ой гармонике к среднему значению,

$$\delta_k(\lambda) = \frac{A_k(\lambda)}{b_0(\lambda)}.$$

На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициентов неравномерности силы от коэффициента λ на первых трех гармониках, построенные при исходных данных, приведенных выше, при изменении коэффициента λ в пределах от 0,5 до 1.

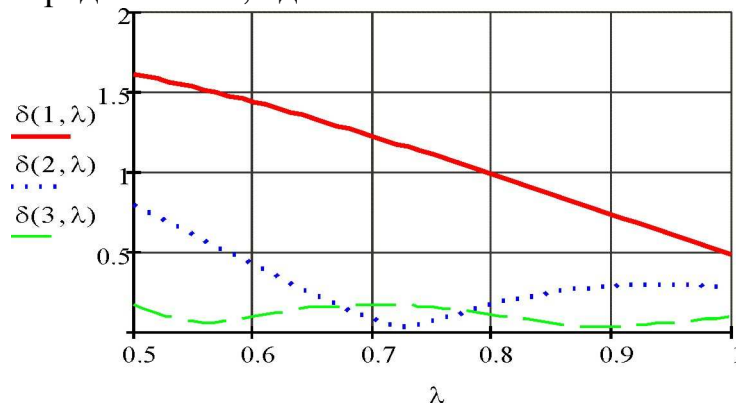


Рис. 3. Зависимость коэффициентов неравномерности силы от соотношения рабочего и технологического циклов

Аналогично выполнен анализ второго и третьего нагрузочных графиков. Для второго графика характерен резкий спад нагрузки в конце выполнения технологической операции, поэтому при разложении в ряд Фурье необходимо учитывать не менее 5 гармоник. Третий график является наиболее плавным. Для него достаточно учитывать две-три гармоники.

Список литературы

1. Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин. М.: Изд-во Юрайт, 2020. 432 с.
2. Артоболовский И.И. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1988. 640 с.
3. Крюков В.А. Теория, моделирование и синтез приводов автоматических роторных линий для обработки давлением: дисс. ... докт. техн. наук. Тула, 2000. 424 с.
4. Корнюхин И.Ф., Крюков В.А., Пашин А.А. Снижение уровня колебаний механической системы с однотипными возмущениями // Известия высших учебных заведений СССР. Машиностроение. 1986. № 6. С. 30-34.
5. Крюков В.А., Прейс В.В. Построение привода исполнительных органов роторной технологической машины с учетом уравнивания мощности // Машиностроение и техносфера XXI века, Донецк, 13–18 сентября 2004 года. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2004. С. 121-124.
6. Банкетов А.Н., Бочаров Ю.А., Добринский Н.С. и др. Кузнечно-штамповочное оборудование. М.: Машиностроение, 1982. 576 с.
7. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.) Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978. 352 с.

Сведения об авторах:

Базанова Анастасия Петровна – студент;

Крюков Владимир Алексеевич – д.т.н., профессор.