

УДК 621.9.011

DOI 10.22213/2413-1172-2017-4-18-22

А. К. Остапчук, кандидат технических наук, Российская академия естествознания; Курганский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения»

Е. М. Кузнецова, Курганский государственный университет; аспирант, Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург

О. В. Дмитриева, кандидат технических наук, Курганский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ЛОРЕНЦА

В современном производстве всегда актуальна проблема повышения качества обработки. При обработке заготовок на станках с ЧПУ уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания обработки и насколько изменяются исходные параметры.

Значительным недостатком существующих станков с ЧПУ является то, что они зачастую не гарантируют заданных жестких требований по точности и качеству обработки деталей. Помимо этого недостатка решение задачи максимального использования возможностей станков осложняется недетерминированностью и нестационарностью условий обработки. Поэтому для более эффективного использования станков необходим подход к управлению технологическим процессом, основанный на адаптации.

Основой для проектирования адаптивных систем управления служат математические модели процесса резания, благодаря которым возможно производить управление технологической обрабатывающей системой. Создание корректных моделей процесса резания металлов возможно только при наличии данных о динамических параметрах технологической системы и законах изменения динамической компоненты силы резания [1].

Существует несколько стандартных подходов к моделированию динамических процессов, происходящих в технологической обрабатывающей системе. В большинстве случаев информация об этих процессах представлена в виде временных рядов. Исследование временных рядов проводится с учетом того, что технологическая система представлена в виде нелинейной динамической системы, заданной определенным набором величин, характеризующих состояние этой системы. Эти величи-

ны называют динамическими переменными; их значения в любой последующий момент времени получаются из исходного набора по определенному правилу [2].

Модель поведения временного ряда все чаще рассматривается с позиций теории детерминированного хаоса. Любая динамическая система, детерминированная правилами, может проявлять случайное поведение, достаточно сложное и непредсказуемое, причем случайность носит принципиальный и неустранимый характер. Причиной потери предсказуемости является чувствительная зависимость режима функционирования динамических систем к сколь угодно малым изменениям начальных условий.

Поведение временного ряда не может быть описано в рамках какого-то одного подхода или метода. Преимущества того или иного метода исследования по сравнению друг с другом ошибочны, так как в отдельности они оперируют весьма ограниченным числом характеристик поведения системы, которые предполагаются неизменными. Но в результате достижения внешних параметров системы, таких как скорость, подача и глубина резания определенных пороговых значений, происходит ее качественная перестройка и смена режима функционирования с новыми значениями характеристик. Поэтому применение совокупности методов позволяет получить более точную временную динамику развития системы и избежать ложной оценки горизонта прогноза [3].

Динамические процессы в технологических системах влияют на устойчивость процесса резания, качество и точность обработки. В большинстве случаев технологическая система работает в неустойчивом режиме [4]. Технологическая обрабатывающая система представляет собой совокупность взаимосвязанных открытых нелинейных динамических подсистем. Энергия, поступающая в технологическую систему, рас-

пределяется между подсистемами, что вызывает перемещение и деформацию отдельных деталей и узлов станка. Кроме того, диссипация энергии происходит в подсистемах по различным механизмам (выделение теплоты при трении в узлах и в подвижных соединениях, изнашивание деталей, автоколебания, релаксация напряжения и т. д.). Любое сколь угодно малое воздействие может привести к возрастанию возмущения. Однако увеличение амплитуды возмущения не может происходить бесконечно. В силу ограниченности энергетических ресурсов системы это возрастание должно прекратиться или смениться уменьшением амплитуды отклонения. Представленный случай отвечает хаотическому режиму функционирования динамических систем. Математическим образом режима функционирования диссипативной динамической системы служит аттрактор – область, которая притягивает к себе траектории движения точек в фазовом пространстве [5].

Технологическую систему можно рассматривать как совокупность механической подсистемы Σ (станок) с трибосредой Θ (контакт резца с обрабатываемой деталью – трибоконтакт). При их взаимодействии формируется новая система ($\Sigma + \Theta$) – так называемая трибосистема. При относительном перемещении отдельных элементов механической системы Σ на поверхности их контакта возникают силы трения, препятствующие этому перемещению. Система резания является основной подсистемой технологической системы. Устойчивое функционирование достигается при самоорганизации системы резания. Однако в процессе резания устойчивое движение упругой системы станка нарушается биениями, периодическим изменением амплитуды автоколебаний и переходом к хаотическому движению. В системе происходит эволюционное изменение свойств трибосреды, формируемой в результате работы сил упругости при заданной мощности. Существование такого механизма формирования динамических структур в трибосистеме свидетельствует об общности свойств динамических систем природы в целом. Можно высказать предположение, что система Лоренца является общей для любых динамических систем и характеризует один из общих сценариев изменения координат состояния системы во времени. Динамический режим в трибосистеме связан с преобразованиями системы трения в Σ . Фактором, стимулирующим изменение свойств трибосреды, является работа при заданной мощности

диссипативных сил. Динамика трибосистемы описывается системой [6]

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} + h \frac{dx}{dt} + cx = -yx, \\ T \frac{dy}{dt} + y = x \left(k_1x + k_2 \frac{dx}{dt} \right). \end{cases}$$

Первое уравнение характеризует изменение сил упругости в трибоконтакте в связи с изменениями суммарной динамической жесткости. Знак минус в первом уравнении показывает, что силы упругости трибосреды всегда направлены против отклонения системы от положения равновесия. Второе уравнение характеризует связь координат с работой и мощностью сил диссипации в трибосистеме. В работах [7, 8] рассматриваемая система приводится к виду системы Лоренца [9]:

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = -C_4z_1 + z_2, \\ \frac{dz_2}{dt} = C_1z_1 - C_2z_2 - C_3z_1z_3, \\ \frac{dz_3}{dt} = C_5z_1z_2 - C_6z_3, \end{cases}$$

где z_1 характеризует перемещение колебательной точки в пространстве Σ , z_2 – скорость изменения точки под действием силы упругости, z_3 – изменение жесткости трибосреды, а коэффициенты $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ принимают следующее выражение:

$$C_1 = \frac{k_1}{k_2} \frac{h}{m} - \frac{c}{m} - \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2; \quad C_2 = \left(\frac{h}{m} - \frac{k_1}{k_2} \right);$$

$$C_3 = \frac{1}{m}; \quad C_4 = \frac{k_1}{k_2}.$$

Порог потери устойчивости данной системы можно определить по следующей формуле:

$$c_{CR} = \frac{hmk_1 + Th^2k_1}{k_2m + k_2Th - 2Tmk_1}.$$

Для расчета системы все ее параметры были приняты постоянными (k_1, k_2, h, m, T), кроме суммарной жесткости системы ($c = c_0 - \partial \varphi / \partial x$). Расчет проводился с учетом следующих известных параметров: масса подсистемы резца $m = 50$ кг, время эксперимента $T = 0,226757$ с, коэффициент сопротивления при резании металлов на воздухе $h_0 = 0,8$ Нс/м. Коэффициент

жесткости $c_0 = 2000$ кг/мм; $C_6 = 1/T = 4,41$ с⁻¹; $C_3 = 1/m = 0,02$.

Для оценки устойчивости трибосистемы принципиальное значение имеют два параметра – C_1 и C_2 , так как они определяют знак в системе. При условии $C_2 > 0$ диссипативное влияние процесса трения достаточно велико, и степень влияния мощности на изменение свойств трибосреды больше, чем работы сил в трибоконтакте. Коэффициент C_1 , характеризующий частоту колебаний в системе, можно представить как функцию от c . Поэтому параметр C_1 (точнее c) в системе будет управляющим. По мере движения точки равновесия системы изменяются значения динамической жесткости и диссипации.

В программном пакете MatlabR2014 была построена модель системы Лоренца для технологической системы (рис. 1), в блоке *value* которой указаны коэффициенты $C_1 \dots C_6$, а в блоке *Lorenz Technic System* – непосредственно сама модель. Результаты расчетов выводятся на блок графопостроителя фазовой плоскости *XY* и *XZ*.

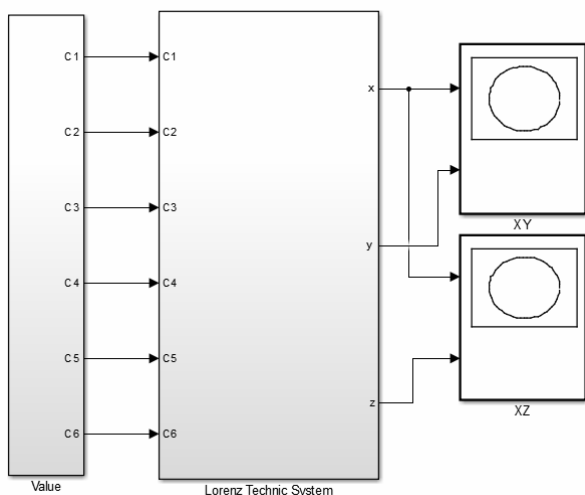


Рис. 1. Система Лоренца для технологической системы

Для проверки найденной модели была проведена серия экспериментов. Эксперимент проводился в условиях: механическая подсистема – токарно-винторезный станок 16К20Ф3С5; обрабатываемый материал – сталь 40Х; режущий инструмент – минералокерамический инструмент ВОК60, твердый сплав Т15К6; условие сухого трения (отсутствие смазывающе-охлаждающих жидкостей); скорость обработки $V = 630-2000$ об/мин; подача $s = 20-150$ мм/мин; глубина резания $t = 0,25$ мм. Во время обработки фиксировался виброакустический сигнал с помощью пьезоаксельрометра с частотным

диапазоном $0 \dots 21$ кГц, установленным на резце для получения временной реализации процесса в проекции на оси координат Ox , Oy , Oz .

С помощью уточненного метода Эйлера были получены формулы оценки параметров:

$$C_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{y_i - \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2H}}{x_i};$$

$$C_5 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{z_{i+1} - z_{i-1} + C_6 z_i}{x_i y_i};$$

$$C_2 = C_3 h_0 - C_4;$$

$$C_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{y_{i+1} - y_{i-1} + C_2 y_i + C_3 x_i y_i}{x_i},$$

где x_i , y_i , z_i – значения временных рядов на i -м шаге соответственно; $N = 10^4$ – длина временного ряда; $H = 0,01$ – шаг интегрирования.

Коэффициент суммарной динамической жесткости [10] $c = \frac{-C_1}{m} + \frac{C_4 h_0}{m} - C_4^2$.

При обработке стальных заготовок на различных подачах были получены значения c для резцов из разных материалов (рис. 2).

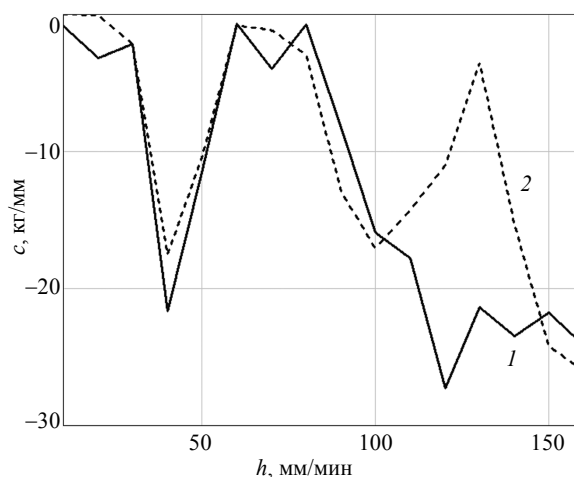


Рис. 2. Зависимость коэффициента суммарной динамической жесткости от подачи: 1 – материал инструмента ВОК60; 2 – материал инструмента Т15К6

Для различных значений c были построены фазовые портреты, по которым определялась устойчивость системы (рис. 3).

В результате экспериментов было выявлено:

- при $c > 0$ система имеет единственную асимптотически устойчивую точку, т. е. при подаче, равной 10 мм, система является относительно устойчивой;

- при $c = 0$; $-11 < c < -7$; $-4 < c < -27$ система находится в состоянии бифуркации и способна самопроизвольно перейти в новое состояние;
- при остальных отрицательных значениях c система относительно устойчива;

- при обработке минералокерамическим инструментом ВОК60 наиболее эффективными для работы станка являются значения подачи 60-90 мм/мин; при обработке твердым сплавом Т15К6 – 10, 30, 60-80, 130 мм/мин.

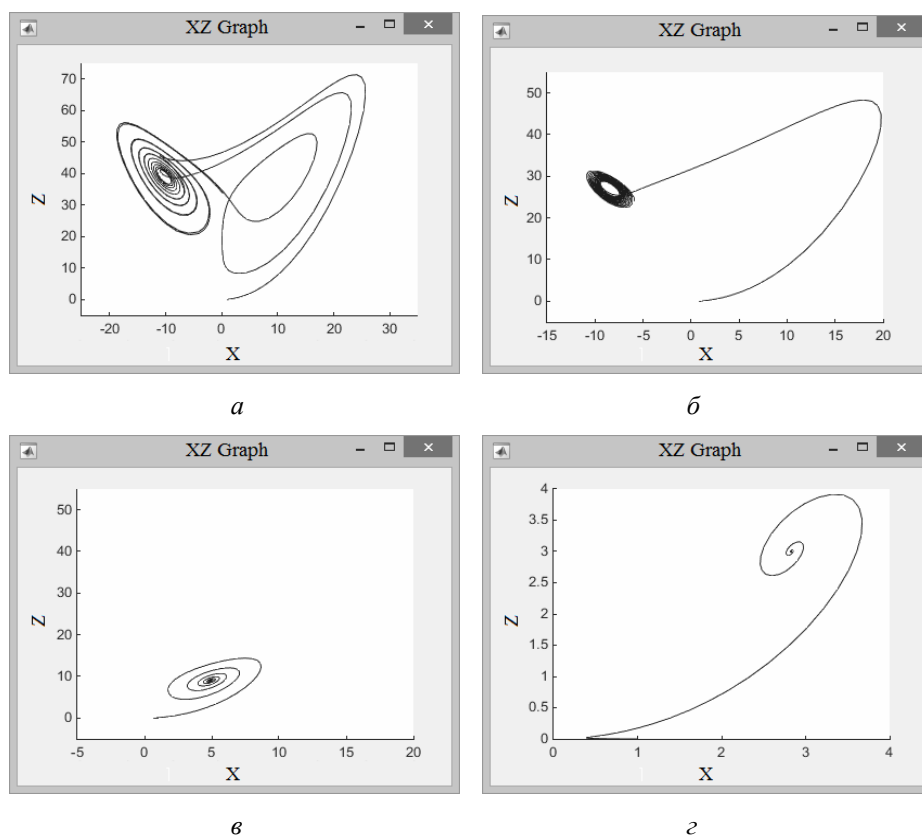


Рис. 3. Устойчивость технологической системы: а – классическая система Лоренца; б – $c = -25$; в – $c = -5$; г – $c = 10$

С точки зрения управляемости процесса особый интерес для трибосистемы представляет случай, когда параметры системы определяют ее положение вблизи бифуркационных преобразований, при этом достаточно малого изменения управляющих параметров, чтобы система самопроизвольно перешла в состояние детерминированного поведения, т. е. наблюдается ее спонтанная самоорганизация [11].

Библиографические ссылки

1. Соломенцев Ю. М., Митрофанов В. Г., Протопопов С. П. Адаптивное управление технологическими процессами. М. : Машиностроение, 1980. 536 с.
2. Кузнецов С. П. Динамический хаос. М. : Изд-во физ.-мат. литературы, 2001. 296 с.
3. Симонов А. М., Остапчук А. К., Овсянников В. Е. Основы обеспечения качества поверхности деталей машин с использованием динамического мониторинга : монография / под ред. Н. Л. Поповой. Курган : Изд-во КГУ, 2010. 118 с.
4. Остапчук А. К., Овсянников В. Е. Синергетический подход к определению отклика технологической системы на внешнее воздействие // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2011. № 3. С. 36–41.

ской системы на внешнее воздействие // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2011. № 3. С. 36–41.

5. Симонов А. М., Остапчук А. К., Овсянников В. Е. Указ. соч.
6. Остапчук А. К. Применение теории детерминированного хаоса к исследованию технологических систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». 2007. Вып. 3. С. 132–134.
7. Остапчук А. К. Моделирование процесса обработки деталей транспортных машин с использованием системы уравнений Лоренца // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. Т. 1. Пермь : ПНИПУ, 2013. С. 254–266.
8. Кузнецова Е. М. Моделирование процесса резания с использованием системы уравнений Лоренца // Вектор современной науки. 2017. № 1.
9. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow. *Journ. of the Atmospheric Science*. 1963. Vol. 20. Pp. 130–141.
10. Остапчук А. К. Применение теории детерминированного хаоса к исследованию технологических систем.
11. Там же.

References

1. Solomencev Yu. M., Mitrofanov V. G., Protopopov S. P. (1980). *Adaptivnoe upravlenie tekhnologicheskimi processami* [Adaptive control of technological processes]. Moscow: Mashinostroenie (in Russ.).
2. Kuznecov S. P. (2001). *Dinamicheskiy kaos* [Dynamical chaos]. Moscow: Fiz.-mat. literatura (in Russ.).
3. Simonov A. M., Ostapchuk A. K., Ovsyannikov V. E. (2010). *Osnovy obespecheniya kachestva poverhnosti detaley mashin s ispol'zovaniem dinamicheskogo monitoringa* [Framework to ensure the surface quality of machine parts using dynamic monitoring] (ed. N. L. Popova). Kurgan: KSU (in Russ.).
4. Ostapchuk A. K., Ovsyannikov V. E. (2011). *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshheniya* [Bulletin of the Ural state University of Railways], no. 3, pp. 36-41 (in Russ.).
5. Simonov A. M., Ostapchuk A. K., Ovsyannikov V. E. (2010). Op. cit.
6. Ostapchuk A. K. (2007). *Vestnik Kurganskogo universiteta, Seriya "Tehnicheskie nauki"* [Bulletin of the Kurgan University, Series "Technical Sciences"], no. 3, pp. 132-134 (in Russ.).
7. Ostapchuk A. K. (2013). *Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and research in the transport sector], vol. 1, pp. 254-266. Perm: PNIPU (in Russ.).
8. Kuznetsova E. M. (2017). *Vektor sovremennoj nauki* [Vector of modern science], no. 1 (in Russ.).
9. Lorenz E. N. (1963). *Journ. of the Atmospheric Science*, vol. 20, pp. 130-141.
10. Ostapchuk A. K. (2007). Op. cit.
11. Ibid.

Получено 25.09.2017