

УДК 621.91

Г. Н. Иванов, к.т.н., доц., МГТУ "СТАНКИН", **А. Н. Ярымов**, вед. инженер, Московский государственный горный университет

E-mail: ivan.genn@ya.ru

Синергетические аспекты моделирования нелинейной динамики технологических процессов абразивной обработки

Представление и выводы синергетики, как науки о совместном действии факторов, на самоорганизующиеся технологические системы «Станок–Деталь–Управляющее устройство».

Ключевые слова: Синергетика, факторы, станок, деталь, управляющее устройство, нелинейная динамика, абразив, шлифование.

G. N. Ivanov, A. N. Yarymov

Synergetic Aspects of Modeling of Nonlinear Dynamics of Technological Process of Abrasive Processing

Representation and synergetics conclusions, as sciences about joint dej-stvii factors, on самоорганизующиеся technological systems "Machine tools-details-actuation devices".

Keywords: Synergetics, factors, the machine tool, detail, the actuation device, nonlinear dynamics, abrasive, grinding.

Используя фундаментальные представления и выводы синергетики как науки о совместном действии факторов, самоорганизующихся в системы, можно априори утверждать наличие следующих общих свойств системы «Станок–Деталь–Управляющее устройство» [1]:

– при монотонном изменении основных параметров технологического процесса после перехода через их критические значения происходит раздвоение значений выходных параметров системы, называемое бифуркацией по данным параметрам;

– бифуркационные значения изменяющихся параметров являются предельно возможными по условию сохранения устойчивости (качества обработки, энергозатратам, продолжительности обработки или другим параметрам) рабочего процесса. Переход через критические значения параметров является переходом параметров в их пространстве на одну из бифуркационных ветвей траектории. Установившиеся значения параметров режима в синергетике называют аттракторами, а области значений параметров, из которых возмущенные состояния рабочих процессов самопроизвольно переходят на аттракторы – областями притяжения аттракторов;

– оптимальные значения параметров режима, как правило, находятся вблизи их бифуркационных значений. Приближение параметров к бифуркационным значениям повышает производительность процесса, но и увеличивает риск выхода параметров из области притяжения аттрактора.

Указанные общие или синергические свойства проявляются для любых систем независимо от их физической сущности: механических, химических, биологических, космических и других. Применительно к технологическим процессам машиностроения, как и для других процессов, они могут быть выявлены в каждом из них. В пространстве параметров, воздействующих на процесс, любые известные ограничения могут рассматриваться как граничные значения областей притяжения соответствующих аттракторов или как бифуркационные значения соответствующих параметров, при переходе через которые возмущенная система перестает возвращаться к исходному аттрактору и переходит к другому.

В любом технологическом процессе обработки деталей на станке существуют ограничения по скорости резания, по подаче, по охлаждению зоны обработки и др. В пространстве параметров, действующих на рабочий процесс, эти ограничения образуют поверхность бифуркаций. При переходе из области допустимых значений параметров за границу области бифуркаций система может функционировать в области недопустимых значений параметров, но с изменением характера режима, например на осциллирующий. При функционировании системы в области допустимых значений параметров наибольшая производительность достигается на поверхности бифуркаций.

Если вследствие воздействия возмущений параметров система отклоняется от аттрактора, оставаясь в области его притяжения, она возвращается к аттрактору асимптотически или с колебаниями асимптотически уменьшающейся амплитуды. Осциллирующий переходный процесс возвращения к аттрактору реализуется в системах с гармонически изменяющейся вынуждающей силой: при фрезеровании, при обработке шестерен, червяков и других деталей с периодически изменяющимися поверхностями.

Практическая полезность представленной интерпретации предельных значений параметров технологических процессов заключается в двух следующих аспектах:

-данная интерпретация объединяет технологические процессы машиностроения с общими природными закономерностями синергические или самоорганизующиеся системы, подводя их фундаментальные свойства под общие природные закономерности;

-экспериментально оценить степень оптимальности реализованных технологических процессов и создать системы управления, поддерживающие параметры технологических процессов обработки

деталей на оптимальном уровне при наличии неконтролируемых возмущений.

Использование новых математических, алгоритмических и программных средств, разработанных в процессе проведения исследований в области обеспечения требуемого жизненного цикла объектов машиностроения, позволяет с определенной степенью инвариантности к характеристикам объектов производства, а также производственных систем разрабатывать и реализовывать процессы управления ими. Последние необходимы для эффективного решения задач изготовления и реновации широкого класса высокоточной продукции, в частности, с помощью технологий абразивной обработки.

Технологические процессы, как разновидность нелинейных непрерывных динамических объектов (ДО) реализуются или функционируют для достижения определенной цели, как правило, за ограниченное время с требуемой точностью в условиях различных пространственных, временных, физических, экономических, экологических ограничений.

В работах [2,3] разработан метод синтеза оптимальных законов управления в замкнутом виде. В работе [4] представлены результаты реализации метода. В развитие метода синтеза оптимальных законов управления в замкнутом виде была проведена работа по моделированию технологического процесса врезного шлифования дорожки качения кольца 01 цилиндрического роликового подшипника. Собственно технологический процесс шлифования представляет собой нелинейную динамическую систему, динамика которой в процессе обработки заготовки может быть описана с помощью дифференциального уравнения вида:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), x(t_0) = x_0; \quad (1)$$

где $x(t)$ - n - мерный вектор её состояния, $u(t)$ - m - мерный вектор управления, f - непрерывная по x и u вектор функция, t - время.

Необходимо получить алгоритм управления технологическим процессом (1) круглого врезного шлифования вида $u(t) = U(x(t))$, обеспечивающий минимум функционалу качества вида:

$$I(x(t), u(t)) = \int_{t_0}^{\infty} \Phi(e(x(t)), u(t)) dt, \quad (2)$$

$$e(t) = x(t) - x_{зад}(t)$$

при ограничениях на фазовые координаты вида

$$g_*(t) \leq g(x(t)) \leq g^*(t); \quad (3)$$

за время $t \leq t_K - t_0$ и обеспечивающий заданные показатели устойчивости и качества переходных процессов в замкнутой системе СПИД, При этом для внутреннего врезного шлифования всегда

$$\exists i : (1 \leq i \leq n) \wedge (x_i(t) = D(t)) \wedge (x_{зад_i} = D_{зад_i}),$$

где $D(t), D_{зад}(t)$ - текущий и заданный диаметры обрабатываемой заготовки типа тела вращения в определяемом конструкторами сечении.

Для обеспечения выдерживания фазовых ограничений в подынтегральную функцию критерия оптимальности вводится аддитивная составляющая вида

$$\Phi_o = \|e_o(t)\|_{Q_1}^2, \quad (4)$$

где Q_1 - положительный весовой коэффициент.

$$e_o(t) = z(g(x(t))) - g(x(t)), \quad (5)$$

а $z(g(x(t)))$ - функция вида :

$$z_i(g_j(x(t))) = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ g_j(x(t)) & i = j \wedge g_*(t) \leq g_j(x(t)) \leq g^*(t) \\ g_{*j}(t) & i = j \wedge g_j(x(t)) < g_*(t) \\ g_j^*(t) & i = j \wedge g_j(x(t)) > g^*(t) \end{cases} \quad (6)$$

$i = \overline{1, s}$; $j = \overline{1, s}$; то есть $z(g) = sat(g)$.

Функция Φ_o , с одной стороны, является непрерывно дифференцируемой, а, с другой стороны, ее минимум соответствует нахождению вектора состояния динамической системы в допустимой области.

Кроме того, в функционал качества аддитивно вводится величина $\|x(t)\|_{Q_2}^2$, что позволяет в последующем уже на этапе синтеза алгоритмов управления технологическим процессом обеспечить заданные показатели устойчивости и качества переходных процессов в замкнутой системе СПИД.

Для модели технологического процесса бесцентрового внутреннего врезного шлифования (8) требуется определить закон управления в замкнутом виде, то есть $u(t) = U(x(t))$, минимизирующий критерий качества вида:

$$I_{BC}(x(t), u(t)) = \int_{t_0}^{\infty} \{ \Phi(e(x(t)), u(t)) + \Phi_o(e_o(x(t)), u(t)) \} dt, \quad (7)$$

где функция Φ определяется (4), вектор-функция $e(t)$ имеет вид (5); вектор-функция $z(g)$ строится в соответствии с (6), то есть $z(g) = sat(g)$, а функции $g(x(t)), g_*(t), g^*(t)$ определяются фазовыми ограничениями (3) исходной задачи.

Полученные законы управления, легли в основу разработанной технологии автоматизированного проектирования и моделирования систем автоматического управления ТП при наличии фазовых ограничений АССЕ (Automatic Control with Constraints Engineering) и реализующего ее программного комплекса (ПК) проектирования, моделирования и обучения ЕМТ (Engineering, Modelling, Teaching).

Технология АССЕ является иерархически структурированной, в связи с тем, что предполагает возможность решения задач различного уровня, в том числе:

- проектирования технологий автоматизированного проектирования технологических процессов абразивной обработки;
- проектирования технологических процессов абразивной обработки в автоматизированном режиме;
- реализация спроектированных ТП АО

Указанная технология на перечисленных уровнях формализована с использованием программных средств *Vpwin* и *Erwin*. (рис. 1, 2).



Рис.1. Информационная модель формирования программного комплекса процесса математического моделирования ТП абразивной обработки



Рис. 2. Функциональная модель технологии проектирования технологий автоматизированного проектирования технологических процессов абразивной обработки

Предложенные математические, алгоритмические и программные средства были использованы при решении ряда практических задач, в том числе при изготовлении наружных колец цилиндрических роликоподшипников (рис. 3).

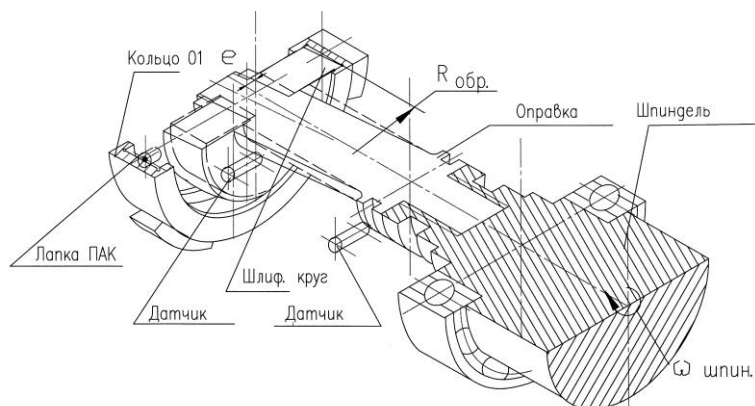


Рис. 3. Схема бесцентровой внутренней обработки дорожки качения наружного кольца 01 цилиндрического роликоподшипника

На рис. 4, 5 представлены результаты проектирования и моделирования ТП бесцентровой внутренней врезного шлифования цилиндрической дорожки качения наружного кольца роликоподшипника.

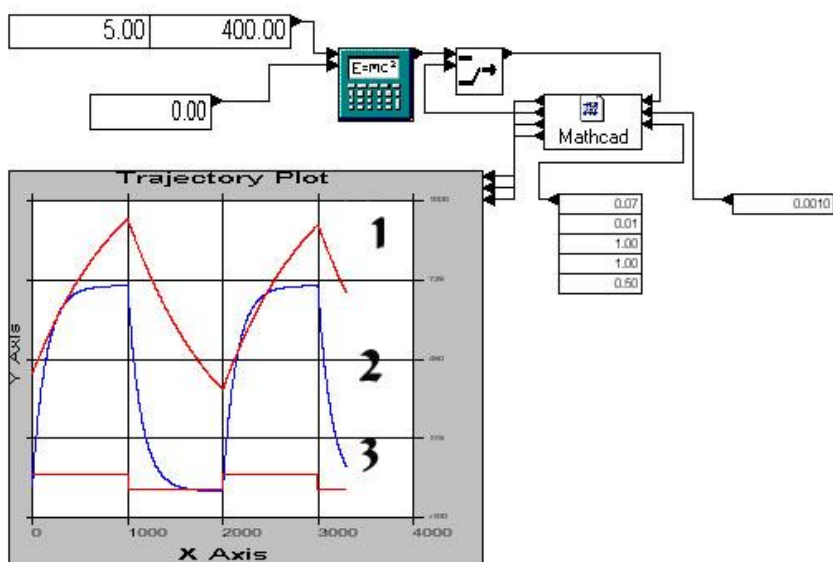


Рис. 4. Результаты математического моделирования типового технологического процесса бесцентровой абразивной обработки дорожки качения кольца 01 цилиндрического роликоподшипника
 1- отжим оправки, 2- радиальная подача, 3 - циклограмма обработки

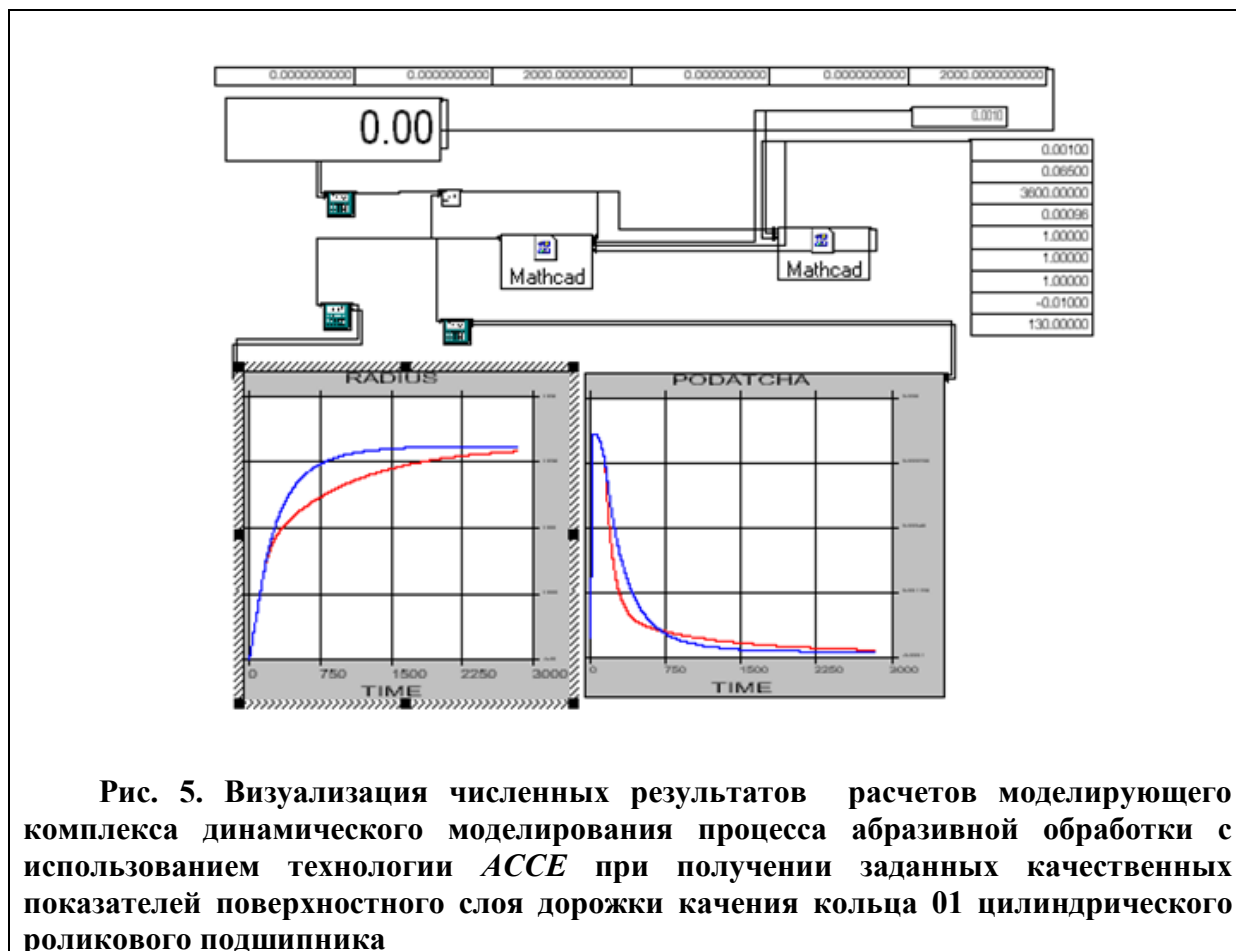


Рис. 5. Визуализация численных результатов расчетов моделирующего комплекса динамического моделирования процесса абразивной обработки с использованием технологии ACSE при получении заданных качественных показателей поверхностного слоя дорожки качения кольца 01 цилиндрического роликового подшипника

Список литературы

1. **Современная** прикладная теория управления: Синергический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова.– Таганрог: Изд. ТРТУ, 2000. – Ч. II.– 559 с.
2. **Акаев А.Б.** Автоматизированное проектирование оптимальных технологических процессов, функционирующих в замкнутых эксплуатационных областях.// Информационные технологии, 1998, №8, с.7-16.
3. **Акаев. А.Б.,** Проектирование и моделирование нелинейной динамики технологических процессов в машиностроении, М.: МГТУ "Станкин", 1999, 222 с., ISBN 5-7028-0095-8.
4. **Акаев А.Б., Иванов Г.Н.** Проектирование процессов обработки рабочих поверхностей ответственных деталей объектов машиностроения при их изготовлении или реновации. – В сб. Материалы международной конференции «Интеграция САПР и систем информационной поддержки изделий», Соловецкие острова. Архангельск: Соломбальская типография, 2004, с. 123-126.