

УДК 629.735.33.002: 621.9.06-529: 004.421

В. Ф. СОРОКИН, Е. В. КОМБАРОВА, В. Д. СОТНИКОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ФОРМИРОВАНИЕ ГЛАДКОГО ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ РЫВКА НА УЧАСТКАХ РАЗГОНА-ТОРМОЖЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ НА ОБОРУДОВАНИИ С ЧПУ

Рассмотрена проблема обеспечения плавности движения инструмента при высокоскоростной обработке деталей на оборудовании с ЧПУ. Решение проблемы зависит не только от гладкости траектории обработки, но и от плавности работы приводов осевых перемещений оборудования. Разработан метод формирования подачи обработки на участках разгона-торможения, обеспечивающий плавность изменения скорости движения инструмента, ускорения, рывка и скорости изменения рывка с учетом их максимально-допустимых значений для приводов конкретного оборудования. Для моделирования законов изменения кинематических параметров применены гармонические тригонометрические функции. Результаты численного эксперимента подтвердили универсализм и высокую эффективность метода, использование которого в системах ЧПУ обеспечит повышение производительности и качества обработки, а также срока службы инструмента.

Ключевые слова: система ЧПУ, планирование подачи, плавность, ограничения привода, ускорение, рывок.

Введение

Одной из проблем, стоящих перед разработчиками технологических процессов высокоскоростной обработки деталей на станках с ЧПУ, является обеспечение плавности движения режущего инструмента, которая способствует повышению производительности обработки, качества обрабатываемой поверхности и срока службы инструмента [1, 2, 6].

Решение этой проблемы зависит не только от использования гладких траекторий обработки, но и от плавности работы приводов осевых перемещений программно-управляемого оборудования в процессе обработки, с учетом ограничений кинематических параметров рассматриваемых приводов, особенно максимальной скорости, ускорения и рывка [4, 5, 6].

В работе [7] показано, что критерий плавности работы мехатронных приводов поступательного движения должен учитывать не только характер изменения во времени скорости и ускорения, но и скорости изменения ускорения, т.е. рывка.

Одной из задач, решение которой способствует обеспечению плавности работы приводов, является задача формирования плавных законов изменения подачи обработки на участках разгона и торможения в каждом кадре управляющей программы (УП).

Так как закон изменения подачи внутри кадра УП должен обеспечивать плавные переходы от начальной подачи кадра F_0 до заданной номинальной подачи F – на участке разгона и от номинальной подачи F до подачи конца кадра $F_{кк}$ – на участке

торможения, то решение задачи планирования подачи на участках разгона-торможения большинство исследователей видят в использовании S - образных кривых для математического моделирования законов изменения параметров технических систем [3, 8, 9].

Известны методы построения S - образных законов изменения подачи с использованием квадратичных, кубических и экспоненциальных функций с двумя и тремя участками кривой, с различными правилами задания исходных данных и стратегией вычисления скорости в цикле управления [8 – 11].

Первый, наиболее известный и применяемый метод приводит к формированию подачи с линейным (трапецеидальным) ускорением. При двух других методах ускорение меняется соответственно по квадратичному и также экспоненциальному закону.

Однако во всех трех рассмотренных случаях график ускорения теряет гладкость в точках достижения максимума ускорения, а график рывка в этих точках терпит разрыв, что противоречит критерию плавности работы приводов [7] и гипотезе гладкости кинематических параметров [2].

Поэтому целью данной статьи является разработка универсального метода синтеза подачи высокоскоростной обработки на участках разгона-торможения, обеспечивающего получение плавных законов изменения во времени скорости перемещения инструмента по траектории обработки, ускорения, рывка и скорости изменения рывка.

1. Математическая модель синтеза подачи на участках разгона-торможения

Выход из противоречивой ситуации по обеспечению плавности работы приводов осевых перемещений станков с ЧПУ содержится в использовании для описания законов изменения кинематических параметров движения инструмента на участках разгона-торможения тригонометрических функций.

В работе [12] упоминается о возможности использования функции $y = \sin^2(x)$ для моделирования законов изменения скорости подачи или ускорения, однако отсутствуют какие-либо сведения, поясняющие эту возможность.

Авторами данной статьи для достижения поставленной цели предлагается использовать функцию $y = \sin^2(x)$ для формирования на участках разгона-торможения гладкого закона изменения *рывка*. Дальнейшее изложение детально поясняет эту возможность.

Введем следующие обозначения кинематических параметров высокоскоростной обработки:

F_0 – подача инструмента в начале кадра (м/сек);

$F_{\text{КК}}$ – подача инструмента в конце кадра (м/сек);

F – заданная рабочая подача инструмента (м/сек);

A_{max} – максимально допустимое ускорение (м/сек²);

J_{max} – максимально допустимый рывок (м/сек³);

DJ_{max} – максимально допустимая скорость изменения рывка (м/сек⁴);

t_p – время разгона от скорости F_0 до скорости F (сек);

t_T – время начала торможения до скорости $F_{\text{КК}}$ (сек);

$S(t)$ – функция изменения во времени пройденного инструментом пути (м);

$V(t)$ – функция изменения во времени скорости движения инструмента (м/сек);

$A(t)$ – функция изменения во времени ускорения движения инструмента (м/сек²);

$J(t)$ – функция изменения во времени рывка (м/сек³);

$DJ(t)$ – функция изменения во времени первой производной рывка (м/сек⁴).

Для обеспечения плавности движения инструмента на участке разгона, необходимо выполнение следующих граничных условий: $V(0) = F_0$; $V(t_p) = F$; $A(0) = A(t_p) = 0$; $J(0) = J(t_p) = 0$; $DJ(0) = DJ(t_p) = 0$.

В этом случае цикл разгона должен состоять из следующих интервалов времени:

$[0, t_1]$ – увеличение ускорения от $A(0) = 0$ до $A(t_1) > 0$;

$[t_1, t_2]$ – постоянное ускорение $A(t) = A(t_1) = A(t_2)$;

$[t_2, t_p]$ – уменьшение ускорения от $A(t_2) > 0$ до $A(t_p) = 0$;

$[t_p, t_T]$ – постоянная скорость $V(t) = F$.

Функцию изменения рывка на участке разгона $t \in [0, t_p]$ представим в виде гладкой кусочной функции (рис. 1г)

$$J(t) = \begin{cases} J_p \cdot \sin^2(\omega \cdot t) & 0 \leq t < t_1; \\ 0 & t_1 < t \leq t_2; \\ -J_p \cdot \sin^2[\omega \cdot (t - t_2)] & t_2 < t \leq t_p; \end{cases} \quad (1)$$

где $J_p \leq J_{\text{max}}$ («рывок разгона» м/сек³) – максимально-возможное значение рывка на участке разгона; ω (1/сек) – частота тригонометрической функции $y = \sin^2(x)$, которую найдем из условия $J(t_1) = 0$, приводящего к соотношениям $\sin^2(\omega \cdot t_1) = 0$; $\omega \cdot t_1 = \pi$;

$$\omega = \frac{\pi}{t_1}. \quad (2)$$

Функции изменения ускорения, скорости и пройденного пути на участке разгона получим, проинтегрировав функции рывка, ускорения и скорости (рис. 1):

$$A(t) = \int J(t) \cdot dt; \quad V(t) = \int A(t) \cdot dt; \quad S(t) = \int V(t) \cdot dt.$$

$$A(t) = \begin{cases} J_p \cdot FA(t) & 0 \leq t \leq t_1; \\ A(t_1) & t_1 < t \leq t_2; \\ A(t_1) - J_p \cdot FA(t - t_2) & t_2 < t \leq t_p; \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } FA(t) = \frac{t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot t / t_1)}{4 \cdot \pi} \cdot t_1.$$

$$V(t) = \begin{cases} J_p \cdot FV(t) + F_0 & 0 \leq t \leq t_1; \\ A(t_1) \cdot (t - t_1) + V(t_1) & t_1 < t \leq t_2; \\ A(t_1) \cdot u - J_p \cdot FV(u) + V(t_2) & t_2 < t \leq t_p; \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{где } FV(t) = \left(\frac{t}{2}\right)^2 - \left(\frac{\sin(\pi \cdot t / t_1)}{2 \cdot \pi} \cdot t_1\right)^2, \quad u = t - t_2.$$

$$S(t) = \begin{cases} J_p \cdot FS(t) + F_0 \cdot t & 0 \leq t \leq t_1; \\ A(t_1) \cdot \frac{(t - t_1)^2}{2} + V(t_1) \cdot (t - t_1) + S(t_1) & t_1 < t \leq t_2; \\ A(t_1) \cdot \frac{u^2}{2} - J_p \cdot FS(u) + V(t_2) \cdot u + S(t_2) & t_2 < t \leq t_p; \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } FS(t) = \frac{t^3}{12} - \frac{t \cdot t_1^2}{8 \cdot \pi^2} + \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot t / t_1)}{16 \cdot \pi^3} \cdot t_1^3, \quad u = t - t_2.$$

Функцию изменения скорости рывка $DJ(t)$ найдем, продифференцировав выражение (1) (рис. 1 г)

$$DJ(t) = \frac{dJ(t)}{dt} = \begin{cases} J_p \cdot \frac{\pi}{t_1} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_1}\right) & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & t_1 < t \leq t_2 \\ -J_p \cdot \frac{\pi}{t_1} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (t-t_2)}{t_1}\right) & t_2 < t \leq t_p \end{cases} \quad (6)$$

Следует отметить, что в частном случае на участке разгона могут отсутствовать интервалы постоянного ускорения $[t_1, t_2]$ и постоянной скорости $[t_p, t_r]$.

Получим математические зависимости для вычисления неизвестных значений кинематических параметров обработки на границах различных интервалов участка разгона $t \in [0, t_p]$.

Из соотношений (3) – (5) найдем ускорение, скорость и пройденный путь, которых система достигнет за время t_1 на первом интервале участка разгона $[0, t_1]$:

$$A(t_1) = J_p \cdot \frac{t_1}{2}; \quad (7)$$

$$V(t_1) = J_p \cdot \frac{t_1^2}{4} + F_0. \quad (8)$$

$$S(t_1) = J_p \cdot t_1^3 \cdot \left(\frac{1}{12} - \frac{1}{8 \cdot \pi^2}\right) + F_0 \cdot t_1. \quad (9)$$

Скорость и пройденный путь, которых система достигнет за время t_2 на втором интервале участка разгона, найдем из соотношений (4) и (5) с учетом зависимостей (7) – (9):

$$V(t_2) = F - J_p \cdot \frac{t_1^2}{4}. \quad (10)$$

$$S(t_2) = \frac{F + F_0}{2} \cdot (t_2 - t_1) + S(t_1). \quad (11)$$

Весь пройденный путь за время разгона будет определяться формулой

$$S(t_p) = \frac{F + F_0}{2} \cdot (t_2 + t_1) \quad (12)$$

Таким образом, создана математическая модель формирования плавного S-образного закона изменения скорости перемещения инструмента по траектории обработки на участках разгона, обеспечивающая плавность изменения ускорения и рывка на этих участках, а также непрерывность функции скорости изменения рывка.

Математические выкладки для построения законов изменения кинематических параметров обработки на участке торможения формируются аналогично и для экономии места статьи не приводятся.

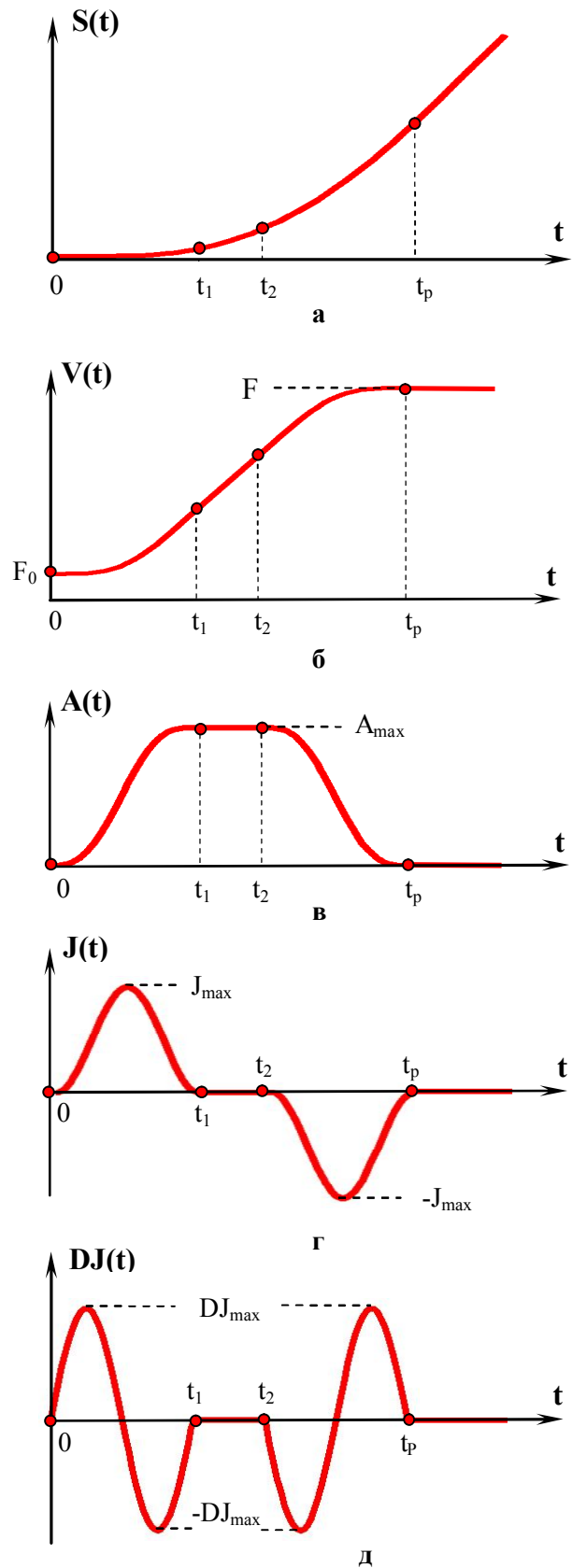


Рис. 1. Графики кинематических параметров движения инструмента на участке разгона: а – пройденный путь; б – скорость; в – ускорение; г – рывок; д – скорость изменения рывка

2. Определение интервалов времени цикла разгона с учетом ограничений на кинематические параметры

Присутствующий в выражениях (11) и (12) параметр времени t_2 зависит от параметра t_1 . Эту зависимость можно определить из уравнения

$$A(t_1) \cdot (t_2 - t_1) = F - F_0 - 2 \cdot [V(t_1) - F_0],$$

которое, с учетом соотношений (7) и (8), примет вид:

$$J_p \cdot \frac{t_1}{2} \cdot (t_2 - t_1) = F - F_0 - 2 \cdot J_p \cdot \frac{t_1^2}{4},$$

откуда окончательно получим

$$t_2 = \frac{2 \cdot (F - F_0)}{J_p \cdot t_1}. \quad (13)$$

Общее время разгона t_p , с учетом того, что интервалы времени $[0, t_1]$ и $[t_2, t_3]$ одинаковы, определится по формуле

$$t_p = t_2 + t_1. \quad (14)$$

Из уравнения (3) при $t = t_1$ и $A(t) = A_{\max}$ найдем время начального интервала разгона t_{1A} , при котором ускорение достигнет максимально-допустимого значения

$$t_{1A} = \frac{2 \cdot A_{\max}}{J_p}. \quad (15)$$

Из уравнения (6) при $t = t_1/4$ и $DJ(t) = DJ_{\max}$ найдем время начального интервала разгона t_{1J} , при котором производная рывка достигнет максимально-допустимого значения

$$t_{1J} = \frac{\pi \cdot J_p}{DJ_{\max}}. \quad (16)$$

Соотношения (15) и (16) показывают, что значение параметра t_1 должно находиться в диапазоне

$$\frac{4 \cdot \pi \cdot J_p}{DJ_{\max}} \leq t_1 \leq \frac{2 \cdot A_{\max}}{J_p}, \quad (17)$$

откуда следует второе ограничение на величину J_p

$$J_p \leq \sqrt{\frac{A_{\max} \cdot DJ_{\max}}{2 \cdot \pi}}. \quad (18)$$

Ранее отмечалось, что при определенных сочетаниях исходных данных, на участке разгона может отсутствовать интервал постоянного ускорения $[t_1, t_2]$.

В этом случае, используя соотношение (8), можно записать уравнение

$$F = F_0 + 2 \cdot J_p \cdot \frac{t_{1F}^2}{4}, \quad (19)$$

из которого найдем время начального интервала разгона t_{1F} для случая, когда система достигает заданной рабочей подачи инструмента F без интервала постоянного ускорения.

Решая уравнение (19) относительно t_{1F} получим

$$t_{1F} = \sqrt{\frac{2 \cdot (F - F_0)}{J_p}}. \quad (20)$$

Если $t_{1A} < t_{1F}$, то участок разгона будет содержать ненулевой интервал постоянного ускорения ($t_2 > t_1$), а если $t_{1F} < t_{1A}$, то интервал постоянного ускорения будет отсутствовать ($t_2 = t_1$), но ускорение на участке разгона не превысит максимально-допустимого ($A(t) < A_{\max}$).

Нетрудно проверить, что при $t_1 = t_{1F}$, когда на участке разгона отсутствует интервал постоянного ускорения, значение t_2 , вычисленное по формуле (13) будет равно значению t_1 , вычисленному по формуле (20).

При маленьком интервале $F - F_0$ значение параметра t_1 , вычисленного по формуле (20) может уменьшиться настолько, что будет нарушено ограничение (17) по максимально-допустимой скорости изменения рывка.

Для исключения такой возможности введем третье ограничение на величину «рывка разгона», определяемое неравенством

$$\frac{\pi \cdot J_p}{DJ_{\max}} \leq \sqrt{\frac{2 \cdot (F - F_0)}{J_p}},$$

решая которое относительно J_p , получим

$$J_p \leq \sqrt[3]{\frac{2 \cdot (F - F_0) \cdot DJ_{\max}^2}{\pi^2}}. \quad (21)$$

Таким образом, оптимальное значение параметра J_p , обеспечивающее выполнение ограничений по скорости, ускорению, рывку и скорости рывка, определим по формуле

$$J_p = \min \left(J_{\max}, \sqrt{\frac{2 \cdot A_{\max} \cdot DJ_{\max}}{\pi}}, \sqrt[3]{\frac{2 \cdot (F - F_0) \cdot DJ_{\max}^2}{\pi^2}} \right), \quad (22)$$

а оптимальное время t_1 начального интервала разгона, по формуле

$$t_1 = \min(t_{1A}, t_{1F}). \quad (23)$$

3. Численные эксперименты

Для проверки достоверности представленного метода формирования подачи высокоскоростной обработки на участках разгона-торможения с плавным характером изменения во времени скорости, ускорения и рывка, проведем численный эксперимент.

Пусть заданы следующие предельно допустимые значения кинематических параметров приводов программно-управляемого оборудования:

$$A_{\max} = 0.5 \text{ м/сек}^2;$$

$$J_{\max} = 5 \text{ м/сек}^3;$$

$$DJ_{\max} = 400 \text{ м/сек}^4.$$

Пример 1. Требуется разогнать инструмент от скорости $F_0 = 0 \text{ м/сек}$ до скорости $F = 0,2 \text{ м/сек}$ (рис. 2).

По формуле (22) найдем значение рывка разгона

$$J_p = \min \left(5, \sqrt{\frac{0,5 \cdot 400}{2 \cdot \pi}}, \sqrt[3]{\frac{2 \cdot (0,2 - 0) \cdot 400^2}{\pi^2}} \right) =$$

$$= \min(5, 0; 5,64; 18,65) = 5,0 \text{ м/сек}^3 = J_{\max}.$$

По формулам (23), (13) и (14) определим граничные значения интервалов времени разгона

$$t_1 = \min \left(\frac{2 \cdot 0,5}{5,0}, \sqrt{\frac{2 \cdot (0,2 - 0)}{5,0}} \right) = \min(0,2; 0,28) = 0,2 \text{ сек};$$

$$t_2 = \frac{2 \cdot (0,2 - 0)}{5,0 \cdot 0,2} = 0,4 \text{ сек}; \quad t_p = 0,4 + 0,2 = 0,6 \text{ сек}.$$

По формулам (6) – (12) вычислим граничные значения кинематических параметров на участке разгона

$$DJ(t_1/4) = 5,0 \cdot \pi / 0,2 = 78,54 \text{ м/сек}^4 < DJ_{\max};$$

$$A(t_1) = 5,0 \cdot 0,2 / 2 = 0,5 \text{ м/сек}^2 = A_{\max};$$

$$V(t_1) = 0,05 \text{ м/сек}; \quad V(t_2) = 0,15 \text{ м/сек}; \quad V(t_p) = 0,2 \text{ м/сек};$$

$$V(t_1) = 0,0595 \text{ м/сек} = V(t_2); \quad V(t_p) = 0,1 \text{ м/сек} = F;$$

$$S(t_1) = 0,0028 \text{ м}; \quad S(t_2) = 0,0228 \text{ м}; \quad S(t_p) = 0,06 \text{ м}.$$

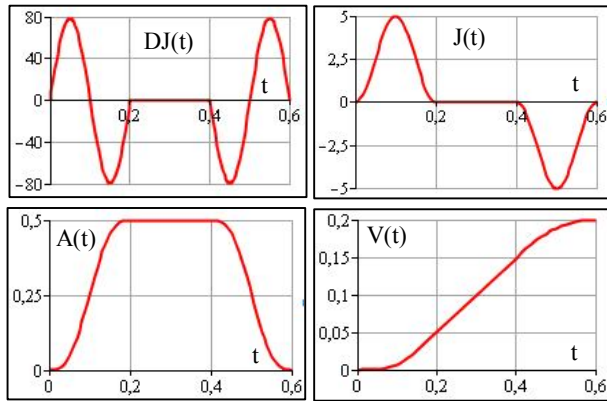


Рис. 2. Графики изменения: скорости рывка, рывка, ускорения и скорости на первом участке разгона

Пример 2. Требуется разогнать инструмент от скорости $F_0 = 0,019 \text{ м/сек}$ до скорости $F = 0,1 \text{ м/сек}$ (рис. 3).

Расчеты осуществляем аналогично примера 1:

$$J_p = \min(5, 0; 5,64; 13,8) = 5,0 \text{ м/сек}^3 = J_p;$$

$$t_1 = \min(0,2; 0,18) = 0,18 \text{ сек};$$

$$t_2 = \frac{2 \cdot (0,1 - 0,019)}{5 \cdot 0,18} = 0,18 \text{ сек}; \quad t_p = 0,18 + 0,18 = 0,36 \text{ сек};$$

$$DJ(t_1/4) = 5,0 \cdot \pi / 0,18 = 87,27 \text{ м/сек}^4 < DJ_{\max};$$

$$A(t_1) = 5,0 \cdot 0,18 / 2 = 0,45 \text{ м/сек}^2 < A_{\max};$$

$$V(t_1) = 0,0595 \text{ м/сек} = V(t_2); \quad V(t_p) = 0,1 \text{ м/сек} = F;$$

$$S(t_1) = 0,0055 \text{ м} = S(t_2); \quad S(t_p) = 0,0214 \text{ м}.$$

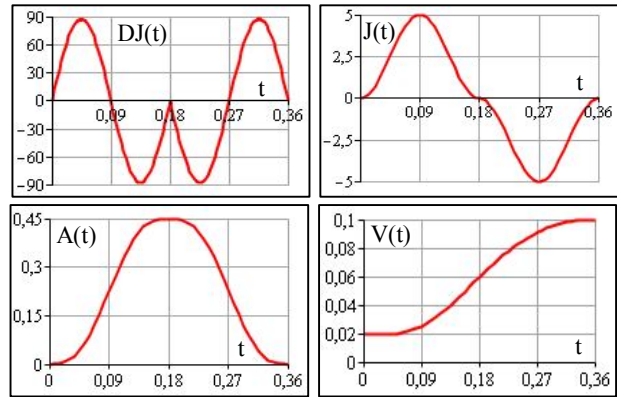


Рис. 3. Графики изменения: скорости рывка, рывка, ускорения и скорости на втором участке разгона

Пример 3. Требуется разогнать инструмент от скорости $F_0 = 0,018 \text{ м/сек}$ до скорости $F = 0,02 \text{ м/сек}$ (рис. 4).

Расчеты осуществляем аналогично примера 1:

$$J_p = \min(5, 0; 5,64; 4,02) = 4,02 \text{ м/сек}^3 < J_{\max};$$

$$t_1 = \min(0,25; 0,0316) = 0,0316 \text{ сек} = t_2; \quad t_p = 0,0632 \text{ сек};$$

$$DJ(t_1/4) = 4,02 \cdot \pi / 0,0316 = 400 \text{ м/сек}^4 = DJ_{\max};$$

$$A(t_1) = 4,02 \cdot 0,0316 / 2 = 0,0635 \text{ м/сек}^2 < A_{\max};$$

$$V(t_1) = 0,019 \text{ м/сек} = V(t_2); \quad V(t_p) = 0,02 \text{ м/сек} = F;$$

$$S(t_1) = 0,00058 \text{ м} = S(t_2) \quad S(t_p) = 0,0012 \text{ м}.$$

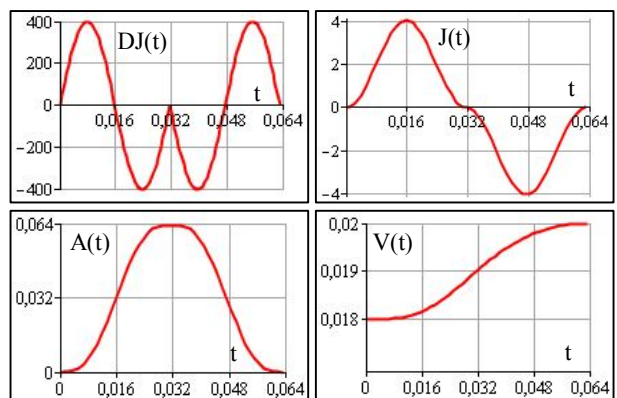


Рис. 4. Графики изменения: скорости рывка, рывка, ускорения и скорости на третьем участке разгона

Заключение

Разработан метод формирования в системе ЧПУ плавного S – образного закона изменения подачи перемещения инструмента на участках разгона-торможения высокоскоростной обработки.

Отличительной особенностью метода является обеспечение плавности изменения не только скорости перемещения инструмента по траектории обработки, но также ускорения, рывка и скорости изменения рывка с учетом их максимально-допустимых значений для приводов конкретного оборудования.

Показано, что решение проблемы обеспечения плавности изменения кинематических параметров возможно при использовании функции $y = \sin^2(x)$ для моделирования изменения рывка.

Результаты численных экспериментов подтвердили универсализм и высокую эффективность метода. Использование представленных алгоритмов в системах ЧПУ обеспечит плавность работы приводов осевых перемещений оборудования, повышение производительности и качества обработки.

Литература

1. Петраков, Ю. В. *Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ [Текст] : монографія / Ю. В. Петраков. – К. : Січка, 2011. – 220 с.*
2. Кривцов, В. С. *Проблемы сплайновой интерполяции с гладко-ограниченными кинематическими параметрами движения в задачах числового программного управления высокоскоростным оборудованием [Текст] / В. С. Кривцов, В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 9(96). – С. 11 – 19.*
3. Chen, J.-H. *An S-curve Acceleration / Deceleration Design for CNC Machine Tools Using Quintic Feedrate Function [Text] / J.-H. Chen, S.-S. Yeh, J.-T. Sun // Comp.-Aided Design & Applications. – 2011. – V. 8(4). – P. 583-592.*
4. Сорокин, В. Ф. *Влияние математических параметров гладких траекторий высокоскоростной обработки на кинематические параметры движения рабочих органов оборудования [Текст] / В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров // Прогрессивные*

технологии и системы машиностроения : междунар. сб. науч. тр. ДонНТУ. – Донецк, 2012. – № 1,2 (44). – С. 231 – 237.

5. Сорокин, В. Ф. *Сравнение кинематических параметров движения при моделировании траектории высокоскоростной ЧПУ обработки сплайнами третьей и пятой степени [Текст] / В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8(95). – С. 11 – 17.*

6. Beudaert, X. *Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path [Text] / X. Beudaert, S. Lavernhe, C. Tournier // International J. of Machine Tools & Manuf. – 2012. – Vol. 57. – P. 73 – 82.*

7. Новикова, Е. А. *Обоснование критериев плавности мехатронных приводов поступательного перемещения [Текст] / Е. А. Новикова // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3. – С. 123-128.*

8. Раисов, Ю. А. *Управление скоростью приводов подачи по S-образным законам для систем CNC [Текст] / Ю. А. Раисов, И. В. Бычков, В. В. Комбаров // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – № 1. – С. 24 – 28.*

9. Раисов, Ю. А. *Реализация S-образных законов управления скоростью подач в устройстве ЧПУ АВИ.04 [Текст] / Ю. А. Раисов, И. В. Бычков, Н. И. Бычков // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 1. – С. 8 – 11.*

10. Heng, M. *Design of a NURBS Interpolator with minimal feed fluctuations and continuous feed modulation capability [Text] / M. Heng, K. Erkorkmaz // International J. of Machine Tools & Manuf. – 2010. – Vol. 50(3). – P. 281 – 293.*

11. Zhao, G. *The Acceleration/Deceleration Control Algorithm Based on Trapezoid-Curve Jerk in CNC Machining [Text] / Guoyong Zhao, Yugang Zhao, Shijun Wang // Research J. of Applied Sciences, Engineering & Technology. – 2013. – Vol. 5(13). – P. 3543 – 3548.*

12. Сосонкин, В. Л. *Методика программирования станков с ЧПУ на наиболее полном полигоне вспомогательных G-функций [Электронный ресурс] / В. Л. Сосонкин, Г. М. Мартинов. – Режим доступа: http://techno-mash.ru/library/metodika_programirovaniya_stanko_cnc.pdf. – 17.04.2015.*

Поступила в редакцию 31.05.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н. Э. Тернюк, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет.

**ФОРМУВАННЯ ГЛАДКОГО ЗАКОНУ ЗМІНИ РИВКА
НА ДІЛЬНИЦЯХ РОЗГОНУ- ГАЛЬМУВАННЯ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНІЙ ОБРОБЦІ
НА ОБЛАДНАННІ З ЧПУ**

В. Ф. Сорокін, Е. В. Комбарова, В. Д. Сотников

Розглянута проблема забезпечення плавності руху інструмента при високошвидкісній обробці деталей на обладнанні з ЧПУ. Вирішення проблеми залежить не тільки від гладкості траєкторії обробки, але й від плавності роботи приводів осьових переміщень обладнання. Розроблений метод формування подачі обробки на ділянках розгону-гальмування, що забезпечує плавність зміни швидкості руху інструмента, прискорення, ривка та швидкості зміни ривка з урахуванням їх максимально-припустимих значень для приводів конкретного обладнання. Для моделювання законів зміни кінематичних параметрів застосовані гармонійні тригонометричні функції. Результати чисельного експерименту підтвердили універсальність і високу ефективність методу, використання якого в системах ЧПУ забезпечить підвищення продуктивності та якості обробки, а також терміну служби інструмента.

Ключові слова: система ЧПУ, планування подачі, плавність, обмеження приводу, прискорення, ривок.

**CREATING SMOOTH LAW CHANGES JERK
IN THE INTERVAL OF ACCELERATION/DECELERATION IN HIGH-SPEED MACHINING
ON CNC EQUIPMENT**

V. F. Sorokin, E. V. Kombarova, V. D. Sotnikov

The problem of ensuring smooth movement of the tool during high-speed machining of parts on CNC equipment is considered. The solution depends not only on the smoothness of the tool path, but also on the smooth operation of drives axial movement of the equipment. There is developed the method of forming feedrate processing in the interval of ACC/DEC, for smooth change of velocity of the tool, acceleration, jerk and the rate of change jerk with regard to their maximum permissible values for a specific drive equipment. Harmonic trigonometric functions are applied to simulate the laws of changes kinematic parameters. The results of numerical experiments confirmed the universality and high efficiency of the method, the use of which in the CNC system will improve the productivity and quality of processing, as well as tool life.

Key words: CNC system, feedrate planing, smooth, drive constraints, acceleration, jerk.

Сорокин Владимир Федорович – д-р техн. наук, проф. каф. технологий производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

Комбарова Елена Владимировна – аспирант каф. технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

Сотников Владимир Данилович – канд. техн. наук, проф. каф. технологий производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».