

УДК 621.9.06-529:004.032.2:004.94

В.В. КОМБАРОВ, Е.А. АКСЕНОВ, Е.В. КОМБАРОВА*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ
В КОНТУРЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ СИСТЕМЫ ЧПУ**

Одним из наиболее важных параметров, определяющих точность обработки, является точное определение параметров перемещения: положение, скорость, ускорение. Шумы, присутствующие в данных положения, значительно влияют на точность определения скорости и ускорения. Рассмотрены методы сглаживания, обеспечивающие наилучшее подавление шума в условиях ограничения вычислительных ресурсов системы ЧПУ. Методы экспоненциального сглаживания, простого и взвешенного скользящего среднего обеспечивают снижение уровня шума от 8,5 до 12,74 раза. Наилучшие результаты сглаживания показал метод взвешенного скользящего среднего.

Ключевые слова: ЧПУ, скорость, ускорение, шум квантования, экспоненциальное сглаживание, скользящее среднее.

Введение

Применение в контуре управления положением органов станка пропорционального интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора с дополнительными корректирующими звеньями по скорости и ускорению позволяет обеспечить высокую точность позиционирования при высокоскоростной обработке. Одним из основных факторов, определяющих эффективность применения такого регулятора, является точность данных о скорости и ускорении рабочих органов, полученных по данным обратной связи по положению. В работе показано, что при управлении органами станка с учетом скорости и ускорения необходимо обеспечить разрядность определения положения порядка $10^{-5} \dots 10^{-6}$ мм. Получение соответствующей разрядности невозможно за счёт увеличения дискретности датчика положения. Предельное увеличение дискретности датчиков позволяет обеспечить разрядность измерения положения порядка $10^{-3} \dots 10^{-4}$ мм.

Целью исследования является определение возможности достижения требуемой разрядности данных при вычислении скорости и ускорения в контуре обратной связи по положению за счет применения алгоритмической обработки данных без изменения дискретности датчиков положения. Исследования проведены на примере обработки экспериментальных данных, полученных при управлении органами станка 16К20Ф3 с системой ЧПУ на базе персонального компьютера. Управление осуществлялось с частотой цикла 1 кГц. Дискретность датчика положения 0,001 мм.

Для достижения поставленной цели проведены

оценка погрешности квантования данных положения, скорости и ускорения; фильтрация экспериментальных данных с применением различных методов. Выполнена оценка методов фильтрации по критерию качества сигнала, обеспечивающего наилучшие результаты фильтрации при минимальном запаздывании отфильтрованного сигнала.

**1. Погрешность квантования данных
в СЧПУ**

Фактическое положение рабочих органов станка, измеряемое дискретным датчиком, является квантованной величиной. Одной из составляющих погрешности измерения квантованной величины является шум квантования $e(t)$

$$e(t) = F[d(t)] - d(t), \quad (1)$$

где $d(t)$ – входной сигнал датчика; $F[\bullet]$ – передаточная функция датчика.

Абсолютный уровень шума квантования определяется величиной дискреты датчика. Для измерения положения погрешность в 1 дискрету (d) является приемлемой. Максимальные значения скорости и ускорения для станка 16К20Ф3 могут достигать 150 $d/\text{такт}$ и 2,1 $d/\text{такт}^2$ соответственно [1]. При вычислении скорости и ускорения по данным положения, величина шума квантования составляет 1,33% и 190,5 % от максимального значения скорости и ускорения соответственно. Глубина регулирования привода составляет 10000, то есть, привод чувствителен к изменению сигнала на 0,01% от максимального значения задания. При такой чувствительности привода полученные величины оценки шума квантования скорости и ускорения являются недопустимыми.

Фактический разброс значений скорости и ускорения превышает оценку шума квантования. Величина ускорения полученная по данным положения без предварительной обработки составляет $\pm 7 d/\text{такт}^2$ (рис. 1), что составляет 330% от величины максимального ускорения. Столь высокая величина погрешности определения ускорения обусловлена тем, что помимо шума квантования в погрешности присутствуют составляющие, зависящие от неравномерности нанесения меток датчика, смещения оси измерительного диска датчика, механических люфтов в системе измерения и погрешности частоты опроса датчика.

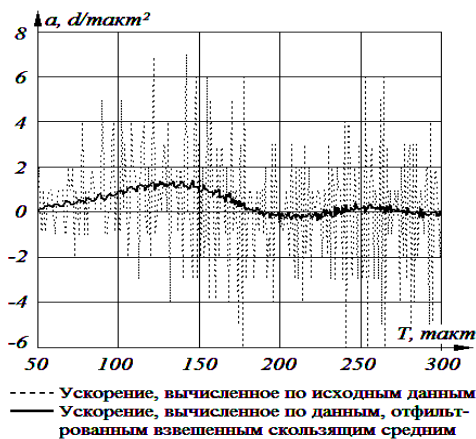


Рис. 1. Изменение фактического ускорения

Простейший способ минимизировать погрешность, вызванную шумами различного происхождения – выполнять фильтрацию данных, получаемых с датчика. Выполнение преобразования данных как функции времени в частотной области сигнала связано со значительными затратами вычислительных ресурсов. Следует выбирать методы обработки, выполняющие преобразование данных непосредственно как функции времени.

Фильтрацию сигнала, в результате которой подавляется высокочастотная составляющая, принято называть сглаживанием.

2. Экспоненциальное сглаживание

Одним из простейших и распространённых методов фильтрации временного ряда является метод экспоненциального сглаживания

$$y_i = y_{i-1} + \alpha (x_i - y_{i-1}), \quad (2)$$

где y_i – сглаженный ряд; x_i – исходный ряд; α – коэффициент сглаживания ($0 < \alpha < 1$).

Простота вычислений обеспечивается за счёт применения рекуррентного соотношения, при котором последующий член ряда выражается через предыдущий. Каждый член ряда учитывает значения всех предыдущих, но при его вычислении выполня-

ется ограниченное количество математических операций.

Недостаток метода экспоненциального сглаживания заключается в том, что при монотонном возрастании (спадании) ряда наблюдается занижение (завышение) результата. Однако, при вычислении производных (скорости и ускорения) величина отклонения становится несущественной.

Подбором коэффициента α (формула (2)) обеспечивается оптимальное соотношение между степенью сглаживания и временем запаздывания. Результат сглаживания данных при различных значениях коэффициента α приведен на рис. 2. Для численной оценки качества сглаживания используем величины времени запаздывания сглаженного сигнала t_3 и среднеквадратического отклонения величины шума $\sigma_{ш}$. Среднеквадратическое отклонение величины шума $\sigma_{ш}$ рассчитываем для временного ряда величины ускорения в установившемся режиме (рис. 3).

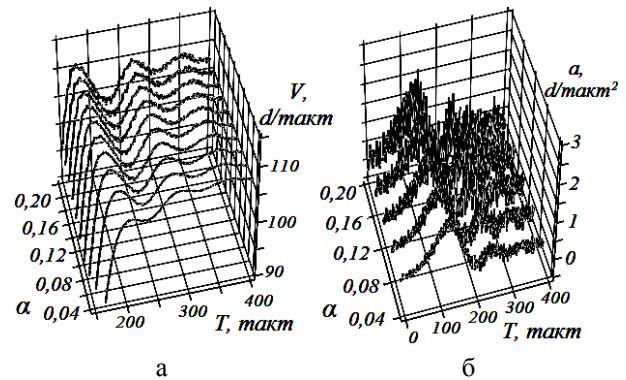


Рис. 2. Скорость (а) и ускорение (б), полученные после экспоненциального сглаживания исходных данных

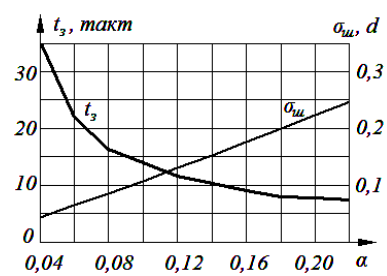


Рис. 3. Критерии оценки качества сглаживания

3. Взвешенное скользящее среднее

Фильтр с бесконечной импульсной характеристикой имеет теоретически бесконечное время установления выходного сигнала при изменении входного сигнала [1]. Поскольку к быстродействию системы ЧПУ предъявляются высокие требования, то предпочтительно использование фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ). При использовании КИХ-фильтра высокое быстродействие дос-

тигается применением короткой весовой функции, но при этом повышается чувствительность к погрешности задания весовых коэффициентов и к шумам.

Одним из распространённых способов фильтрации, реализующих КИХ-фильтр, является метод скользящего среднего. Суть метода заключается в том, что каждый элемент выборки заменяется средневзвешенным значением группы соседних элементов:

$$y_i = \sum_k x_{i-k} \alpha_k, \quad (3)$$

где y_i – сглаженный ряд; x_i – исходный ряд; α_k – весовые коэффициенты (весовая функция), $\sum \alpha_k = 1$; $k = 0 \dots N - 1$; N – размер окна усреднения.

Размер окна усреднения, подбирается таким образом, чтобы обеспечить достаточное сглаживание при минимальном искажении сигнала.

Рассмотрим сглаживание при весовой функции, распределённой по нормальному закону

$$\alpha_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-k^2}{2\sigma^2}\right),$$

где σ^2 – дисперсия распределения.

Чтобы выполнялось условие $\sum \alpha_k = 1$, производится нормализация весовой функции

$$\alpha_k = \frac{\alpha_k}{\sum_n \alpha_n}.$$

Для фильтрации экспериментальных данных использованы весовые функции с различными σ (рис. 4). Результаты обработки данных после фильтрации представлены на рис. 5. Критерии качества сглаживания представлены на рис. 6.

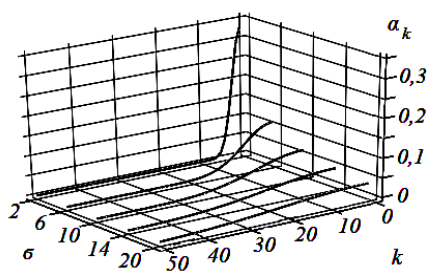


Рис. 4. Весовые функции скользящего среднего

Недостаток метода заключается в значительных по сравнению с экспоненциальным сглаживанием затратах вычислительных ресурсов.

4. Простое скользящее среднее

В случае, когда весовые коэффициенты α_k равны, скользящее среднее называют простым и операция сглаживания сводится к вычислению средней арифметической величины N значений исходного ряда

$$y_i = \sum_k x_{i-k} / N. \quad (4)$$

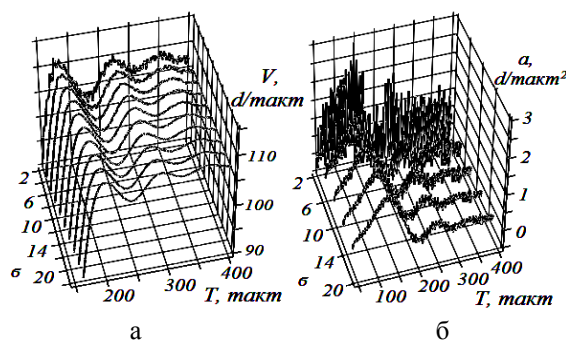


Рис. 5. Сравнение графиков скорости (а) и ускорения (б), полученных после сглаживания исходных данных методом взвешенного скользящего среднего

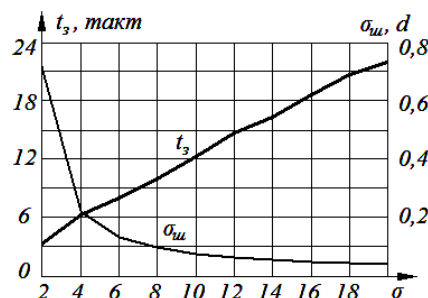


Рис. 6. Критерии оценки качества сглаживания для метода взвешенного скользящего среднего

Такой метод позволяет значительно сократить число операций по сравнению с методом взвешенного скользящего среднего. Для вычисления одного члена ряда методом взвешенного скользящего среднего необходимо выполнить N операций умножения и $(N - 1)$ операцию сложения.

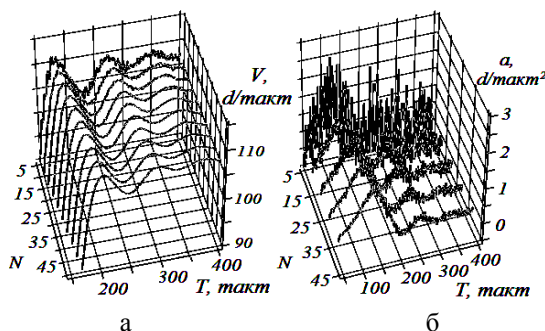


Рис. 7. Сравнение графиков скорости (а) и ускорения (б), полученных после сглаживания исходных данных методом простого скользящего среднего

Вычисления методом простого скользящего среднего требуют $(N - 1)$ операцию сложения и одну операцию деления. Варьируя размером окна усреднения, подбирается диапазон, при котором обеспечивается оптимальное соотношение величины шума к времени запаздывания. На рис. 7 показаны графики скорости и ускорения, вычисленные после сглаживания исходных данных при размерах окна ус-

реднения от 5 до 50 отсчётов. Критерии оценки качества сглаживания методом простого скользящего среднего приведены на рис. 8.

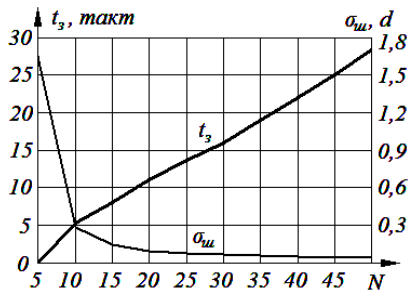


Рис. 8. Критерии оценки качества сглаживания для метода

5. Сравнение результатов

На качество управления приводами оказывают влияние оба критерия качества сглаживания, рассмотренных ранее. Величина времени запаздывания сглаженного сигнала t_3 приводит к увеличению фазы запаздывания управляющего сигнала в контуре управления органами станка. Диапазон частот, в котором сдвиг по фазе первых гармоник сигналов обратной связи скорости и задания скорости не превышает 90° , называется полосой пропускания контура регулирования скорости. Рекомендуется в качестве ограничения полосы пропускания выбирать наименьшую допустимую частоту 20 Гц для тиристорных и 40 Гц для транзисторных электроприводов [2].

Величина среднеквадратического отклонения шума сигнала ускорения в установившемся режиме $\sigma_{ш}$ напрямую связана с величиной ошибки управляющего сигнала, формируемого для привода. Выбор параметров сглаживания выполняется на основе компромисса между временем запаздывания t_3 и величиной шума сглаженного сигнала $\sigma_{ш}$ с использованием составного решающего критерия качества

$$\Phi = c_{t_3} t_3 + c_{\sigma_{ш}} \sigma_{ш}, \tag{5}$$

где c_{t_3} и $c_{\sigma_{ш}}$ – коэффициенты значимости критериев.

Значения c_{t_3} и $c_{\sigma_{ш}}$ выбираются таким образом, чтобы выполнялось соотношение

$$c_{t_3} + c_{\sigma_{ш}} = 1. \tag{6}$$

Численные значения t_3 и $\sigma_{ш}$ в рассмотренных выше примерах отличаются на два порядка. Для уравнивания их значимости коэффициенты c_{t_3} и $c_{\sigma_{ш}}$ так же должны отличаться на 2 порядка. Поскольку, величина времени запаздывания оказывает существенное влияние на качество управления в системе ЧПУ, для коэффициента c_{t_3} введем дополнительный множитель равный трем

$$c_{t_3} / (0,01 \cdot 3) = c_{\sigma_{ш}}. \tag{7}$$

Таким образом, для поиска оптимального сглаживания использованы следующие значения

весовых коэффициентов составного критерия качества $c_{\sigma_{ш}} \approx 0,97$, $c_{t_3} \approx 0,03$.

Зависимости критерия качества для трех вышеописанных методов фильтрации приведены на рис. 9, которые позволяют определить оптимальные значения коэффициентов для каждого метода.



Рис. 9. Критерии качества сигналов для: а – экспоненциального сглаживания, б – метода взвешенного скользящего среднего, в – метода простого скользящего среднего

Учитывая, что время запаздывания исходного сигнала равно нулю, а среднеквадратическое отклонение шума – 1,695, можем принять критерий качества исходного сигнала равным 1,644.

Результаты вычислений оптимальных значений параметров сведены в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальные значения параметров

Метод обработки	Параметр	t_3	$\sigma_{ш}$	Φ
Исходный сигнал		0	1,695	1,644
Экспоненциальное сглаживание	$\alpha = 0,18$	8	0,199	0,433
Взвешенное скользящее среднее	$\sigma = 6$	8	0,133	0,369
Простое скользящее среднее	$N = 15$	8	0,145	0,381

Время запаздывания сигналов скорости и ускорения после сглаживания исходных данных составило 8 тактов при периоде собственных колебаний около 90 тактов. Запаздывание сигнала скорости в 8 тактов соответствует полосе пропускания 31,25 Гц, что приемлемо для управления тиристорными приводами и недостаточно для управления транзисторными приводами.

Наилучший результат показал метод взвешенного скользящего среднего. При запаздывании в 8 тактов уровень шума при вычислении величины ускорения снижен в 12,74 раза, что соответствует разрядности определения положения порядка 10^{-4} мм. Метод экспоненциального сглаживания показал наихудшие результаты. При той же величине запаздывания в 8 тактов уровень шума по ускорению снижен в 8,5 раз. Метод простого скользящего

го среднего при том же запаздывании обеспечивает снижение уровня шума по ускорению в 11,7 раза.

Заключение

В представленной работе показано, что при вычислении параметров скорости и ускорения рабочих органов станка уровень шума квантования составляет 1,33% и 190,5% от максимального значения скорости и ускорения соответственно. Общий уровень шумов при вычислении ускорения по данным положения доходит до 330% от величины максимального ускорения.

Проведенные исследования с целью определения возможности достижения требуемой разрядности данных при вычислении скорости и ускорения показали, что применение алгоритмов сглаживания позволяют снизить уровень шумов квантования примерно на порядок.

Для достижения разрядности порядка $10^{-5} \dots 10^{-6}$ мм, необходимой для полного использования диапазона регулирования привода, недостаточно применения только методов сглаживания. Необходимо применять комплекс мероприятий, включающий в себя подбор дискретности датчика, изменение алгоритма обработки данных датчика положения, сглаживание данных. Только в этом случае может быть достигнута максимально возможная разрядность данных

Литература

1. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. – М: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
2. Мартынов А.А. Проектирование электроприводов: учеб. пособие / А.А. Мартынов. – СПб.: СПбГУАП, 2004. – 97 с.

Поступила в редакцию 31.05.2011

Рецензент: проф. кафедры технологии и машиностроения и ремонта В.Ф. Сорокин, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, Украина.

ОБРОБКА ДАНИХ ПРИ ОБЧИСЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ ТА ПРИСКОРЕННЯ В КОНТУРІ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ СИСТЕМИ ЧПК

В.В. Комбаров, Є.О. Аксьонов, О.В. Комбарова

Одним з найважливіших параметрів, що визначають точність обробки, є точне визначення параметрів переміщення: положення, швидкість, прискорення. Шуми, що присутні в даних положення, значно впливають на точність визначення швидкості та прискорення. Розглянуті методи згладжування, що забезпечують найкраще зниження рівня шумів в умовах обмеження обчислювальних ресурсів системи ЧПК. Методи експоненційного згладжування, простого та зваженого ковзаючого середнього забезпечують зниження рівня шуму від 8,5 до 12,74 разів. Найкращі результати згладжування показав метод зваженого ковзаючого середнього.

Ключові слова: ЧПК, швидкість, прискорення, шум квантування, експоненційне згладжування, ковзаюче середнє.

SPEED AND ACCELERATION DATA PROCESSING IN THE CNC SYSTEM FEEDBACK LOOP

V.V. Kombarov, E.A. Aksenov O.V. Kombarova

One of the most important parameters determining accuracy is a precise determination of motion parameters: position, velocity, acceleration. Noise in the data position significantly affects the accuracy of speed and acceleration. The methods of smoothing that provide the best noise reduction with limited computational abilities of the CNC system are considered. Methods of exponential smoothing, simple and weighted moving average increase level noise from 8.5 to 12.74 times. Method of weighted moving average showed the best smoothing results.

Key words: CNC system, velocity, acceleration, quantization noise, exponential smoothing, moving average.

Комбаров Владимир Викторович – научный сотрудник кафедры технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kombarov1@mail.ru.

Аксьонов Евгений Александрович – аспирант кафедры проектирования радиоэлектронных систем ЛА Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aks-ev@mail.ru.

Комбарова Елена Владимировна – мл. научн. сотрудник кафедры технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.