

КОНТРОЛЬНЫЕ КАРТЫ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Н.И. Пасько, И.С. Картавец

Рассмотрен ряд особенностей применения метода контрольных карт (КК) для управления процессом текущего контроля и подналадки станка с числовым программным управлением (ЧПУ), таких как: тип модели, описывающей изменение износа резца; вариант адаптации параметров КК и т.д. Приведена классификация используемых КК по пяти классификационным признакам.

Ключевые слова: контрольная карта, станок с ЧПУ, классификация, подналадка.

Применение метода контрольных карт [1] для контроля процесса обработки на станках с ЧПУ имеет особенности, состоящие в том, что кроме контроля размера обрабатываемой детали необходимо контролировать и износ режущего инструмента. Соответственно необходимо из-за износа режущего инструмента (резца) вовремя вводить коррекцию размерной настройки станка и своевременно заменять затупившийся инструмент. В дальнейшем будем рассматривать токарную обработку, конкретно – обработку тела вращения на заданный диаметр, хотя результаты могут быть применены для растачивания и отчасти для фрезерования.

Приведем необходимые определения и обозначения. Размерный износ резца после обработки t деталей обозначим $Y(t)$. В общем случае $Y(t)$ – это неубывающая случайная функция (функция износа), причем $Y(0)=0$. Случайность – следствие случайности процесса износа. Интенсивность износа подвержена разбросу из-за возможного разброса: припуска на обработку и твердости заготовок, из-за разброса стойкости резцов и др. Параметрический отказ резца наступает, если износ $Y(t)$ становится больше нормативной величины L . Причем здесь L – это размерный износ, он в два раза больше радиального износа резца [1], так как радиальный износ влияет непосредственно на радиус обрабатываемой детали, а размерный износ – на размер (диаметр) детали.

Период стойкость резца в штуках обработанных деталей T определяется в результате решения уравнения

$$Y(T) = L. \quad (1)$$

Если L равно ширине поля допуска d , то соответствующую стойкость T_d называется размерной стойкостью.

Процесс замены резца с размерной настройкой станка будем называть подналадкой. Подналадка включает замену резца и настройку станка на размер и, возможно, обработку и контроль размера первой (пробной) детали. В результате подналадки станок настраивается на размер X_0 – уровень начальной настройки.

Под циклом подналадки понимается отрезок процесса обработки между подналадками. Длина цикла подналадки – это число деталей, обработанных за цикл.

Размер деталей (диаметр) в пределах цикла подналадки характеризуется функцией $X(t)$. Во избежание брака этот размер должен находиться в границах поля допуска, то есть:

$$X^- \leq X(t) \leq X^+, \quad (2)$$

где X^- , X^+ – нижняя и верхняя границы поля допуска соответственно, мм.

Если $X(t) < X^-$ – то имеет место брак первого вида, если $X(t) > X^+$ – то брак второго вида.

Чтобы исключить брак, периодически проводится коррекция размерной настройки средствами ЧПУ. При коррекции инструмент не заменяется, если его ресурс еще не исчерпан. О величине остаточного ресурса можно судить по непосредственному замеру износа резца или по косвенным признакам (времени резания, суммарной коррекции размера и др.)

Функция $X(t)$ в общем случае случайна и зависит как от t так и от $Y(t)$. Эта зависимость определяется с учетом: границ поля допуска; периодичности и величин коррекций; погрешности обработки и др. А именно

$$X(t) = X_0 + Y(t) - Sh(t) + \Delta(t). \quad (3)$$

Здесь $Sh(t)$ – суммарная коррекция размерной настройки с момента последней подналадки до обработки t -ой детали, а $\Delta(t)$ – погрешность обработки t -ой детали.

Количество обработанных деталей между коррекциями будем называть подпартией и обозначать m_j , где j – номер коррекции в текущем цикле, величина которой равна h_j .

Количество возможных вариантов организации контроля по методу контрольных карт велико. Необходима их классификация по различным признакам и типам математических моделей подходящих для их описания. Особенности возникают так же при разработке алгоритмов оптимизации параметров контрольных карт.

Приведем **классификацию контрольных карт** для станков с ЧПУ по следующим признакам:

- A.** Число коррекций размерной настройки за цикл подналадки.
- B.** Число и место контрольных операций размера деталей в цикле.
- C.** Возможность контроля износа резца в системе ЧПУ станка.
- D.** Модель процесса износа резца по наработке
- E.** Вариант оптимизации параметров контрольных карт.

По **проведению коррекций** (признак A) возможны варианты:

- A₀.** Коррекция в цикле не проводится.
- A₁.** Коррекция проводится после обработки очередной подпартии.
- A₂.** Коррекция проводится, если после обработки очередной подпартии средний размер выборки n последних деталей $\bar{X}_n$ превышает сиг-

нальную границу X_2 .

A₃. Размер подпартий и величина коррекций в цикле постоянны.

A₄. Размер очередной подпартии в цикле не постоянен, а величины коррекций постоянны.

A₅. Величина коррекции зависит от номера подпартии, размер подпартий в текущем цикле постоянен.

A₆. Размер подпартий и величина коррекций в цикле не постоянны.

По **проведению контроля размера деталей** (признак **B**) возможны варианты:

B₀. Контроль размеров деталей в цикле подналадки не проводится.

B₁. Контролируются только одна последняя деталь в конце цикла подналадки.

B₂. Контролируются выборка из n последних деталей в конце цикла подналадки.

B₃. Контролируется одна последняя деталь в каждой подпартии.

B₄. Контролируется выборка из n последних деталей в каждой подпартии.

По **проведению контроля износа резца** (признак **C**) возможны варианты:

C₀. Контроль износа резца не проводится, резец заменяется по достижению плановой наработки или по отказу.

C₁. Непосредственный контроль износа резца не проводится, а оценка износа проводится по изменению размеров деталей после обработки очередной подпартии.

C₂. Износ резца контролируется в конце цикла подналадки (после плановой наработки или отказа).

C₃. Износ резца контролируется после обработки очередной подпартии.

C₄. Износ резца контролируется после очередной подпартии. Резец заменяется, если при этом износ Y больше сигнальной границы по износу Y_2 .

C₅. Износ резца контролируется после обработки очередной подпартии, размер которой зависит от предыдущего износа. Резец заменяется, если при этом износ Y больше сигнальной границы по износу Y_2 .

По **типу модели процесса износа резца** (признак **D**) возможны варианты:

D₀. Линейная модель с постоянной интенсивностью износа:

$$Y(t) = c \cdot t, \quad (4)$$

где $Y(t)$ – износ резца после обработки t деталей с момента замены резца, мм; c – интенсивность износа (величина износа резца на одну деталь), мм/шт.

D₁. Линейная модель со случайным изменением интенсивности из-

носа при замене резца:

$$Y(t) = C \cdot t. \quad (5)$$

где C – случайная величина, зависящая от разброса стойкости резцов.

Если стойкость T имеет распределение по закону Вейбулла [3] с плотностью:

$$f(t) = \frac{\alpha}{\rho} \left(\frac{t}{\rho} \right)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\rho} \right)^{\alpha} \right],$$

то C имеет плотность:

$$f(c) = \frac{\alpha \rho}{L} \left(\frac{L}{c \rho} \right)^{\alpha+1} \exp \left[- \left(\frac{L}{c \rho} \right)^{\alpha} \right],$$

D₂. Линейная модель накопления:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^t \Delta Y(i), \quad (6)$$

где $\Delta Y(i)$ – износ резца за время обработки i -й детали.

В общем случае эта величина случайна с постоянным средним значением $\Delta \bar{Y}(i) = c$ и дисперсией $\sigma_{\Delta Y}^2$. $Y(t)$ как случайная величина имеет асимптотически нормальное распределение со средним значением и дисперсией:

$$\bar{Y}(t) = ct, \quad D_Y(t) = \sigma_{\Delta Y}^2 \cdot t$$

D₃. Нелинейная модель накопления в которой $\Delta \bar{Y}(i) = c(i)$, а дисперсия $\sigma_{\Delta Y}^2$ не зависит от i .

В этом случае $Y(t)$ как случайная величина имеет тоже асимптотически нормальное распределение со средним значением и дисперсией:

$$\bar{Y}(t) = \sum_{i=1}^t c\{i\}, \quad D_Y(t) = \sigma_{\Delta Y}^2 \cdot t.$$

D₄. Нелинейная модель накопления износа:

$$\bar{Y}(t) = \varphi(t). \quad (7)$$

где $\varphi(t)$ – неслучайная неубывающая функция, т.е. $\varphi(t_1) < \varphi(t_2)$, если $t_1 < t_2$, $\varphi(0) = 0$.

В качестве $\varphi(t)$ может быть использован полином третьей степени, то есть

$$\varphi(t) = a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3. \quad (8)$$

Коэффициенты a_1, a_2, a_3 оцениваются из опыта, например, методом наименьших квадратов по трем или большему числу замеров износа резца при различных значениях t . Дисперсия износа растет пропорционально наработке t , то есть

$$\sigma_Y^2(t) = b_1 \cdot t. \quad (9)$$

D₅. Нелинейная модель износа, в которой среднее значение:

$$\bar{Y}(t) = \varphi(t), \quad (10)$$

а дисперсия $\sigma_Y^2(t)$ зависит от t , например

$$\sigma_Y^2(t) = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2, \quad (11)$$

где коэффициенты b_0, b_1, b_2 определяются из опыта аналогично a_1, a_2, a_3 .

D₆. Нелинейная модель износа со случайным коэффициентом C_1 :

$$Y(t) = C_1 \cdot \varphi(t), \quad (12)$$

где C_1 – случайный коэффициент, изменяющийся при замене резца и зависящий от разброса стойкости резцов.

D₇. Нелинейная модель износа со случайными коэффициентами C_1 и C_2 :

$$Y(t) = C_1 \cdot \varphi(C_2 \cdot t), \quad (13)$$

где C_1, C_2 – случайные коэффициенты, изменяющиеся при замене резца и зависящие от разброса стойкости резцов.

По *варианту расчета и оптимизации параметров* контрольных карт (признак **E**) возможны варианты:

E₀. Параметры контрольной карты, рассчитанные по априорной информации (по предварительно собранной статистике) и в дальнейшем не изменяются.

E₁. Внецикловая адаптация. Параметры контрольной карты не изменяются в течение цикла подналадки и уточняются после каждого цикла для следующего цикла. При этом учитывается статистика размеров деталей и износов резца за текущий и прошлые циклы.

E₂. Внутрицикловая адаптация I. Размер текущей коррекции определяется по результатам контроля размеров деталей перед коррекцией.

E₃. Внутрицикловая адаптация II. Размер следующей подпартии рассчитывается исходя из предыдущих измерений размеров деталей текущего цикла.

E₄. Внутрицикловая адаптация III. Величина коррекции и размер следующей подпартии рассчитывается исходя из измерений износа резца в текущем цикле.

Приведем *примеры обозначения* вариантов контрольных карт в соответствии с проведенной классификацией.

Карта с обозначением $\{A_0B_0C_0D_0E_0\}$ выполняется без коррекции размерной настройки в цикле подналадки (A_0), контроль деталей в середине цикла не проводится (B_0), износ резца не контролируется (C_0), износ резца растет линейно с постоянной интенсивностью износа s (D_0), параметры контрольной карты рассчитаны заранее и не изменяются в процессе работы и подналадки (E_0).

В этом случае

$$Y(t) = c \cdot t, \quad X(t) = X_0 + Y(t) + \Delta, \quad (14)$$

где X_0 – уровень начальной настройки, мм, Δ – случайная компонента размера, зависящая от колебаний припуска на обработку, колебаний твердости заготовки, погрешности базирования, погрешности измерения, случайности процесса износа резца и прочих факторов, мм.

Оптимизации подлежит уровень начальной настройки X_0 и плановая наработка до замены резца t_p .

В карте с обозначением $\{A_3B_3C_0D_0E_0\}$ коррекция размерной настройки проводится периодически, например, после обработки m деталей, то есть j -тая коррекция проводится после обработки $m \cdot j$ деталей. Величина коррекций h_j зависит от j (A_3). Перед коррекцией контролируется только последняя деталь (B_3). Контроль износа резца не проводится. Замена резца проводится после плановой наработки t_p или по отказу (C_0). Износ резца растет линейно (D_0). Параметры контрольной карты рассчитываются с использованием предварительно собранной статистики (E_0).

В этом случае оптимизации подлежат: уровень начальной настройки X_0 период между коррекциями m , величина коррекции h_j ; плановая наработка за цикл подналадки t_p :

$$Y(t) = c \cdot t, \quad X(t) = X(t_j + i) = X(t_j) - h_j + c \cdot i + \Delta, \quad t_j = m \cdot j, \quad (15)$$

где i – номер обработанной детали после j -й до $(j+1)$ -й коррекции.

Число коррекций за цикл равно или меньше:

$$k = \text{int}(t_p / m),$$

где $\text{int}(\dots)$ – целая часть от выражения в скобках. Число коррекций меньше k , если преждевременно произойдет отказ резца.

В карте с обозначением $\{A_1B_3C_1D_6E_2\}$: число коррекций в цикле фиксировано (A_1); перед коррекцией контролируется последняя деталь (B_3); износ резца не контролируется и резец заменяется по суммарной коррекции, если она достигает нормативного износа L (C_1); износ изменяется по закону: $Y(t) = c \cdot \varphi(t)$ (D_6); в адаптивном режиме оптимизируются наработки между коррекциями m_j (E_2).

В этом случае

$$X(t) = X(t_j + i) = X(t_j) - h_j + C \cdot [\varphi(t) - \varphi(t_j - i)] + \Delta, \quad (16)$$

Число коррекций за цикл равно или больше:

$$k = \text{int}(L / (X^+ - X_0)), \quad (17)$$

Величина коррекции h_j в этом случае постоянна и равна h . Во избежание брака на величину коррекции должно быть наложено ограничение, то есть

$$h \leq |X^+ - X_0|.$$

Период до j -й коррекции $m_j = t_j - t_{j-1}$. Моменты коррекции определя-

ются в результате решения следующих уравнений относительно t_j :

$$c \cdot \varphi(t_j) = j \cdot h, \quad j = 1, \dots, k, \quad (18)$$

где c определяется через значения C в предыдущих циклах.

Значение коэффициента разброса стойкости C оценивается методом наименьших квадратов из статистики размеров деталей $X(t_j)$, $j=1, \dots, k$, если в качестве оценки величины износа $Y(t_j)$ брать $j \cdot h + X(t_j) - X_0$, то дисперсия $D(c)$:

$$D(c) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [Y(t_j) - C \cdot \varphi(t_j)]^2 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [j \cdot h + X(t_j) - X_0 - C \cdot \varphi(t_j)]^2, \quad (19)$$

Минимум (19) достигается при

$$C = \frac{\sum_{j=1}^k [\varphi(t_j) \cdot (j \cdot h + X(t_j) - X_0)]}{\sum_{j=1}^k \varphi^2(t_j)},$$

Карта с обозначением $\{A_2B_4C_1D_4E_{1,2}\}$ предполагает, что число коррекций в цикле не фиксируется. Потребность в коррекции определяется исходя из размеров деталей после обработки подпартии (A_7). При этом контролируется размер последних n деталей в подпартии (B_4). Если средний размер выборки X_n больше сигнальной границы X_2 , то проводится коррекция. Величина коррекции рассчитывается, например, по формуле

$$h_j = X_n - X_0,$$

Резец заменяется, если после обработки j -ой подпартии $Sh + h_j > L$. В противном случае проводится коррекция и обрабатывается ещё подпартия из m деталей и так далее.

Износ резца $Y(t)$ как случайная величина имеет асимптотически нормальное распределение с плотностью

$$f_t(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b_1 t}} \exp\left[-\frac{(y - \varphi(t))^2}{2b_1 t}\right],$$

где среднее значение износа и дисперсия определяется по формулам (7 - 9).

Параметры контрольной карты X_0 , X_2 , m , n оптимизируются в режиме внецикловой адаптации (E_1), а величина коррекции и необходимость коррекции определяются внутри цикла по результатам контроля размеров деталей после каждой подпартии (E_2).

Воспользуемся приведенной классификацией для упорядочения ранее полученных результатов путем введения соответствующих обозначений. В работе [5] по терминологии данной статьи рассмотрена карта с обозначением $\{A_0B_0C_0D_1E_0\}$. В работе [3] кроме предыдущей карты и ее вариантов рассмотрена карта с обозначением $\{A_0B_0C_4D_1E_0\}$. В работе [6] дополнительно рассмотрена карта с обозначением $\{A_0B_0C_5D_1E_0\}$. Работы [7,8] относятся к контрольной карте с обозначением $\{A_0B_0C_2D_1E_1\}$. В работе [9] рассмотрена математическая модель контрольной карты с обозначением $\{A_0B_4C_1D_2E_0\}$.

Предлагаемая классификация и обозначение контрольных карт для станков с ЧПУ, по мнению авторов, позволяет не только упорядочить известные результаты, но и дает направление для разработки других вариантов контрольных карт, возможно более эффективных.

Список литературы

1. ГОСТ Р 50779.42-98 (ISO8258-91). Статистические методы. Контрольные карты Шухарта.
2. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1966. 264 с.
3. Иноземцев А.Н., Пасько Н.И. Надежность станков и станочных систем. Тула: Изд-во ТулГУ, 2002. 182 с.
4. Гумбэль Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.
5. Пасько Н.И. Расчет периода планово-предупредительной замены инструмента // Станки и инструмент. № 1. 1976. С.24-26.
6. Пасько Н.И., Анцева Н.В. Оптимизация режима профилактического восстановления основного технологического оборудования машиностроительного предприятия // СТИН. 2008. №4. С. 2.
7. Пасько Н.И., Шилов П.В. Адаптивная непараметрическая оптимизация плановой наработки инструмента при планово-предупредительной системе замены. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3, 2011. С. 283-287.
8. Пасько Н.И., Шилов П.В. Адаптивная оптимизация плановой наработки инструмента при планово-предупредительной замене // СТИН. № 9. 2012. С. 13-16.
9. Пасько Н.И., Картавцев И.С. Математическая модель контроля размерной настройки станка с ЧПУ по методу контрольной карты // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. №2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 292 – 301.

Пасько Николай Иванович, д-р техн. наук, проф., pasko37@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Картавцев И.С., аспирант, ivan_2la@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CONTROL CHARTS FOR NC MACHINE TOOLS.

N.I. Pasko, I.S. Kartavtsev

Some peculiarities of applying the control chart-based (CC) approach to in-process control and corrective adjustment for NC machine tools, namely, the cutter wear variation model, the CC parameters adaptation strategy, etc. have been considered. A CC classification with five identifying features has been covered.

Key words: control chart, NC machine tool, classification, corrective adjustment.

Pasko Nikolay Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, pasko37@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kartavtsev I.S., postgraduate, ivan_2la@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.591

ПОГРЕШНОСТИ НАВЕДЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ С УВЕЛИЧЕННЫМИ УГЛАМИ НАВЕДЕНИЯ

В.С. Захариков

Рассмотрена система стабилизации и наведения, обеспечивающая расширенный диапазон углов горизонтального и вертикального наведения. В результате моделирования работы системы определены погрешности системы стабилизации и наведения линии визирования, установленной на борту беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: система стабилизации; погрешности наведения; углы наведения.

В настоящее время при поиске и сопровождении различных целей широкое применение получили беспилотные летательные аппараты (БПЛА). БПЛА характеризуются малыми габаритами и массой, и, как следствие, высокой маневренностью. Для максимального использования разрешающей способности оптико-электронных систем БПЛА применяются системы стабилизации и наведения линии визирования (ССиН ЛВ) [8]. Малые габариты БПЛА требуют применения легких и малогабаритных ССиН ЛВ. Высокая маневренность носителя и отслеживаемых целей требуют увеличения углов наведения ССиН ЛВ.

Обзор работ [1], посвященных ССиН, показал, что практически все существующие в настоящее время ССиН ЛВ построены на основе двухосного карданова подвеса. Недостатком такого исполнения является то, что при угле вертикального наведения близком к 90° проявляется эффект «складывания рамок», и, как следствие, не обеспечивается стабилизация и слежение за целью [2-6].

Ввиду отмеченного недостатка, в работе [7] предложена кинематическая схема ССиН ЛВ (рис.1), обеспечивающая углы наведения по высоте