

10. Bednarczyk S., Pietrus H. and Stryczek J., *Pompa gerotorowa i sposób kompensacji luzów w pompie gerotorowej*, Polish Patent PL 186682 B1 from 27.02.2004
11. Stryczek J., *Zahn und Zahn. Hydraulische Verdrängermaschinen mit Zykloidenverzahnung setzen sich durch*, Maschinenmarkt 21, 1994
12. Biernacki K. and Stryczek J., *Badania naprężeń i odkształceń kół cykloidalnych wykonanych z polioksyme-tylenu i zastosowanych w maszynach hydraulicznych*, Sympozjon PKM, Polska, Przemysł, 9, 2007
13. Balawender A. and Stryczek J.: *Der Langsamlaufende Motor mit Doppelter Zykloidenverzahnung, Projektierungs-grundlagen, Fertigung untersuchungen*, Drittes Polnisch-Deutsch Seminar, Warschau-Zakopane, 1999
14. Bania S., Banaś F. and Stróznia K., *Sprzęgło hydrostatyczne*, Polish Patent PL 170813, from 1997
15. Banaś M. and Stryczek J., *The design and modeling of the drive system with multifunctional hydrostatic machine*, 5<sup>th</sup> International Fluid Power Conference (5<sup>th</sup> IFK), 3, 2006

УДК 621.923

**Ю.К. Новоселов, д-р техн. наук, С.М. Братан д-р техн. наук, Д.А.Каинов к.т.н., доц. СевНТУ, г. Севастополь, Украина**

### **ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК НА ОПЕРАЦИЯХ ЧИСТОВОГО ШЛИФОВАНИЯ**

---

*У статті розглянуті питання побудови динамічних моделей обробки заготовок на операціях чистового шліфування.*

*In the article the questions of construction of dynamic models of treatment of semi's are considered on operations of the clean polishing.*

---

При построении модели процесса шлифования целесообразно использование системного подхода и модульного принципа, что позволяет, как рассматривать отдельные явления, происходящие в процессе обработки заготовки, так и их взаимодействие. Использование модулей дает возможность заменять отдельные блоки без существенных изменений остальной системы по мере накопления и уточнения информации о происходящих частных процессах и явлениях [1, 2, 3].

Множественность одновременных или практически одновременных элементарных процессов взаимодействия абразивных зерен с заготовкой при существенных различиях их параметров делает нецелесообразным попытки детализированного описания индивидуальных параметров и требует построения обобщенных групповых характеристик посредством теории стохастических процессов. Средние устойчивые значения считаются детерминированной компонентой, а в качестве случайной – рассматриваются отклонения от детерминированной составляющей. Основные факторы, которые учитываются при построении описания, представляются в форме

стохастических закономерностей, связывающих входные переменные и результирующие обобщенные координаты системы [4, 5].

При таком подходе форма инструмента характеризуется выражением:

$$\Phi_3(x_3, y_3, z_3, \tau) \Big|_{\tau} = 0, \quad \forall \tau \in [\tau_0, \tau_{fin}), \quad (1)$$

где  $[\tau_0, \tau_{fin})$  – время протекания технологического процесса.

Наиболее простым является представление формы образующей шлифовального круга  $R(\Phi)$  в цилиндрической системе координат с центром, расположенным в центре инструмента, осью  $OZ_k$ , совпадающей с осью его вращения, и углом  $\Phi$ , отсчитываемом от некоторой фиксированной точки в плоскости, ортогональной оси  $OZ_k$ , в виде разложения в ряд Фурье:

$$R(\Phi) = R_0 + \sum_{i=1}^n R_i \cdot \cos(\Omega_i \cdot \Phi + M_i), \quad (2)$$

где  $R_0$  – базовое значение радиус-вектора формы шлифовального круга;

$R_i, \Omega_i, M_i$  – амплитуда, пространственная частота и фаза  $i$ -той компоненты разложения.

Использование системы базовых ортогональных функций в (2) позволяет характеризовать форму набором численных коэффициентов.  $R_i$ , и  $M_i$  ( $i \in (0..n]$ ) и оперировать более компактным аналитическим представлением. Конкретные значения параметров (2) могут быть определены измерением и математической обработкой текущих радиус-векторов рабочей поверхности шлифовального круга. Все элементы правой части (2) за исключением  $R_0$  характеризуют отклонения формы шлифовального круга от идеальной при взаимодействии его с заготовкой: первая компонента – несовпадение центра формы круга и оси его вращения, вторая гармоника – влияние эллипсности и т.д. Компоненты отклонения формы с малыми значениями  $i$  могут быть существенно уменьшены при балансировке и правке инструмента.

В связи с ограниченной точностью фиксации начальной точки отсчета и привязки к положению круга в процессе обработки, определение фазы  $M_i$  для больших номеров  $i$  затруднительно (высокая априорная статистическая неопределенность), ее распределение целесообразно считать случайным и равномерным.

Форма поверхности детали также может быть представлена в виде:

$$r(\varphi) = r_0 + \sum_{i=1}^m r_i \cdot \cos(\omega_i \varphi + \gamma_i), \quad (3)$$

являющимся точным описанием для замкнутых поверхностей, имеющих периодический характер, и хорошим приближением для любых поверхностей (за исключением, быть может, неточностей описания вблизи точек существенной «негладкости» формы или ее границ, где проявляется эффект Гиббса). Такая «негладкость» формы наблюдается в точке (зоне) взаимодействия инструмента и заготовки.

Зона является участком взаимопроникновения поверхностей детали и заготовки и на выходе из указанной зоны наблюдается скачкообразное изменение  $r(\varphi)$ .

При вращении шлифовального круга и заготовки, углы поворотов  $\Phi$  и  $\varphi$  зависят от времени. При постоянном числе оборотов за единицу времени

$$\Phi(\tau) = \Omega_1 \cdot (\tau - \tau_0), \quad \varphi(\tau) = \omega_1 \cdot (\tau - \tau_0) \quad (4)$$

где  $\tau$ ,  $\tau_0$  – текущее и начальное время соответствующих процессов.

Использование соотношений (4) позволяет трансформировать пространственные характеристики для инструмента (2) и заготовки (3), математически характеризуемые функциями пространственного аргумента, во временную область и рассматривать исходные представления форм в виде полей как зависимые от времени – процессы. Учет изменения износа шлифовального круга (в том числе и неравномерного) возможен при рассмотрении коэффициентов  $R_i$  в выражении (2) как функций времени [6, 7].

Если вследствие съема материала с поверхности заготовки ее радиус стационарно изменяется (виток спирали Архимеда с постоянным шагом)

$$r(\tau) = r_0(\tau_0) - L \cdot (\tau - \tau_0), \quad (5)$$

то параметры для зависимости (3) достаточно просто определить как

$$r_i = 2 \cdot L / i \quad \text{и} \quad \gamma_i = 0 \quad \forall i \in (1, n), \quad (6)$$

где  $L$  – скорость изменения межцентрового расстояния.

Последние выражения иллюстрируют нецелесообразность быстрого отвода инструмента при окончании схема припуска.

При недоступности прямому измерению текущих параметров  $R(\Phi)$  и соответствующего им процесса  $R(\tau)$  целесообразно использовать информацию о групповых статистических характеристиках инструмента, описывающих отклонения формы круга  $\Delta R(\Phi)$  от  $R_0$  как случайную функцию  $\Delta R(\Phi)$ . В силу зависимости отклонения формы не только от текущих по углу  $\Phi$ , но и от предыдущих значений [7], целесообразно рассматривать  $\Delta R(\tau)$  как марковский случайный процесс [8], а зависимость  $\Delta R(\tau)$  – как результат преобразования нормированного гауссовского белого шума динамическим звеном (формирующим фильтром) и использовать такой блок модели [6]. Описание формирующего фильтра строится по априорной информации – круглограммам рабочей поверхности инструмента, которые можно представить математическим ожиданием и корреляционной функцией для  $\Delta R(\Delta\Phi)$ , трансформировать во временную область применением (4) и в частотную область использованием известных соотношений Винера-Хинчина.

Корреляционная функция отклонения от округлой формы для профилограмм с достаточной степенью точности аппроксимируется зависимостью:

$$R_{xx}(\Phi) = R_{xx}(0) e^{-\beta \cdot n |\Phi|} \cos(\alpha n \Phi) \quad (7)$$

здесь  $R_{xx}(0)$  – соответствует дисперсии отклонения формы;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты автокорреляции;  $n$  – число оборотов круга в единицу времени.

Применение к (7) прямого преобразования Фурье приводит к результату:

$$S(\Omega) = R_{xx}(0) \frac{2\alpha \cdot n |n^2(\alpha^2 + \beta^2) + \omega^2|}{\omega^4 + 2\omega^2 n^2(\beta^2 - \alpha^2) + n^4(\beta^2 - \alpha^2)^2}, \quad (8)$$

который характеризует энергетический спектр случайного процесса  $\Delta R(\tau)$ . Для определения параметров эквивалентного динамического звена целесообразно осуществить операцию факторизации (8) и представить формирующий фильтр в одной из форм [6]:

– передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{K(Tp + 1)}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}; \quad (9)$$

– дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\ddot{z}T_1^2 + \dot{z}T_2 + z = \dot{y}_\phi KT - Ky_\phi; \quad (10)$$

– системой двух дифференциальных уравнений первого порядка, представленных в пространстве состояний:

$$\dot{X}_\phi = A_\phi X_\phi + B_\phi w, \quad (11)$$

и уравнения оценивания – получения «модельного» значения  $\Delta \hat{R}(\tau)$ :

$$y_\phi = D_\phi X_\phi \quad (12)$$

где  $X_\phi = \begin{bmatrix} x_{\phi 1} \\ x_{\phi 2} \end{bmatrix}$ ,  $A_\phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix}$ ,  $B_\phi = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2 T_3 \end{bmatrix}$ ,  $D_\phi = [1 \ 0]$ ,  $w$  – единичный

гауссовский белый шум,  $y_\phi$  – выходная координата формирующего фильтра по статистическим характеристикам соответствующая  $\Delta R(\tau)$  из (7). Для этих описаний непосредственно определяются характеристики

$$T_1 = \frac{1}{v^2(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad T_2 = \frac{2\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad T = \frac{1}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad K = \sqrt{2} \sqrt{\frac{R_{xx}(0)\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}}. \quad (13)$$

Формирующий фильтр в виде системы уравнений (11) и (12), реализует окрашенный шум с характеристиками, соответствующими профилю рельефа инструмента из гауссовского белого шума, что позволяет осуществлять статистическое моделирование  $\Delta R(\tau)$ .

Расчетная схема взаимодействия шлифовального круга и заготовки для процесса круглого наружного шлифования представлена на рис. 1

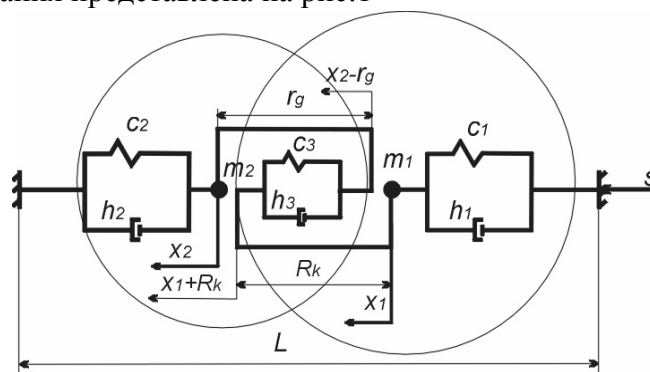


Рис. 1. Схема взаимодействия шлифовального круга и заготовки при круглом наружном шлифовании

Для дальнейшего описания введены следующие обозначения:

$L, x_1, x_2$  - межцентровое расстояние, отклонения координат центра шлифовального круга и детали относительно соответствующих положений динамического равновесия, соответственно;  $R, c_1, h_1, m_1$  - радиус круга, его приведенная жесткость, коэффициент демпфирования и масса;  $r, c_2, h_2, m_2$  - радиус детали, ее приведенная жесткость, коэффициент демпфирования и масса;  $c_3, h_3$  - соответствующие эквивалентные параметры зоны контакта круга и детали.

Из схемы рис.1. непосредственно следует

$$0 \leq t_f(\tau) = R(\phi(\tau)) + r(\varphi(\tau)) - L(\tau) - \int_{\tau_0}^{\tau} \dot{S} d\tau + y_T - y_{yII} \quad (14)$$

где  $t_f$  - глубина внедрения режущих зерен круга в материал заготовки, отсчитываемая от ее исходной поверхности,  $\dot{S}$  - скорость поперечной подачи,  $y_{yII}$  и  $y_T$  температурные и упругие деформации технологической системы.

Условием протекания процесса взаимодействия круга и заготовки (существования зоны резания) является неотрицательность значения  $t_f$ . Нарушения условия в левой части (14) нарушает условие целостности структуры технологической системы.

С учетом обозначений  $x_1 = x_{10} + \Delta x_1$ ;  $x_2 = x_{20} + \Delta x_2$  на основе принципа возможных перемещений, для системы, представленной на рис. 1, построено описание в виде совокупности дифференциальных уравнений, характеризующих динамику перемещений центров круга и детали в процессе круглого наружного шлифования:

$$\begin{cases} m_1 \Delta \ddot{x}_1 + h_1 \Delta \dot{x}_1 + c_1 (x_{10} + \Delta x_1) + h_3 (\Delta \dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) + c_3 (x_{10} + \Delta x_1 + R + \Delta R) - \\ - h_3 (\Delta \dot{x}_2 - \Delta \dot{r}) - c_3 (x_{20} + \Delta x_2 - r - \Delta r) = 0, \\ m_2 \Delta \ddot{x}_2 + h_2 \Delta \dot{x}_2 + c_2 (x_{20} + \Delta x_2) + h_3 (\Delta \dot{x}_2 - \Delta \dot{r}) + c_3 (x_{20} + \Delta x_2 - r - \Delta r) - \\ - h_3 (\Delta \dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) - c_3 (x_{10} + \Delta x_1 + R + \Delta R) - h_2 \dot{L} - c_2 (L + \Delta L) = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где  $x_{10}, x_{20}, \Delta x_1, \Delta x_2$ , - координаты центра вращения круга и центра вращения детали и их приращения соответственно;  $\Delta R$  и  $\Delta r$  - приращения радиусов круга и заготовки, вызванные отклонениями их форм;  $L, \Delta L$  - межцентровое расстояние и его изменение.

После вычитания из (15) равенств, соответствующих условиям статического равновесия системы рис. в номинальном режиме:

$$\begin{cases} c_1 x_{10} + c_3 (x_{10} + R) - c_3 (x_{20} - r) = 0, \\ c_2 x_{20} + c_3 (x_{20} - r) - c_3 (x_{10} + R) - c_2 L = 0, \end{cases} \quad (16)$$

получим систему уравнений, характеризующих процесс взаимодействия круга и заготовки при шлифовании в отклонениях от номинальных параметров и разрешая ее относительно старших производных, запишем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [-(h_1 + h_3)\dot{x}_1 - (c_1 + c_3)x_1 + h_3\dot{x}_2 + c_3x_2] - \\ - \frac{1}{m_1} [h_3(\Delta\dot{R} + \Delta\dot{r}) - c_3(\Delta R + \Delta r)], \\ \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} [-(h_2 + h_3)\dot{x}_2 - (c_2 + c_3)x_2 - h_3\dot{x}_1 - c_3x_1] + \\ + \frac{1}{m_2} [h_3(\Delta\dot{R} + \Delta\dot{r}) + c_3(\Delta R + \Delta r)] + \frac{1}{m_2} [h_2\dot{L} + c_2\Delta L], \end{array} \right. \quad (17)$$

С обозначениями  $y_1 = x_1$ ,  $y_2 = \dot{y}_1 = \dot{x}_1$ ,  $y_3 = x_2$ ,  $y_4 = \dot{y}_3 = \dot{x}_2$  система (17) может быть приведена к нормальной форме Коши и, для компактности дальнейшего изложения, представлена в матричной форме:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + [B_{01}, B_{02}] \cdot \begin{bmatrix} Z_1 \\ \dot{Z}_1 \end{bmatrix} + C_0 \cdot U, \quad (18)$$

где

$$\dot{Y}_0 = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix}, \quad A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{(c_1 + c_3)}{m_1} & -\frac{(h_1 + h_3)}{m_1} & \frac{c_3}{m_1} & \frac{h_3}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{c_3}{m_2} & -\frac{h_3}{m_2} & -\frac{(c_2 + c_3)}{m_2} & -\frac{(h_2 + h_3)}{m_2} \end{bmatrix}, \quad Y_0 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix},$$

$$B_0 = [B_{01} \quad B_{02}], \quad Z_1 = [\Delta R + \Delta r], \quad Z_2 = [\Delta\dot{R} + \Delta\dot{r}],$$

$$B_{01} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{c_3}{m_1} \\ 0 \\ -\frac{c_3}{m_2} \end{bmatrix}, \quad B_{02} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h_3}{m_1} \\ 0 \\ -\frac{h_3}{m_2} \end{bmatrix}, \quad C_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{c_2}{m_2} & \frac{h_2}{m_2} \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} \Delta L \\ \dot{L} \end{bmatrix}$$

В системе (18) дополнительно введены обозначения:

$Y_0$  – вектор (матрица-столбец) состояния системы,  $\dot{Y}_0$  – вектор производных состояний системы,  $A_0$  – матрица, характеризующая динамические свойства системы,  $[B_{01}, B_{02}] = B_0$  – матрица влияния отклонений форм детали и круга,  $[Z_1, \dot{Z}_1]^T = Z$  – матрица отклонений форм детали и круга от номинальных,  $C_0$  – матрица управления процессом (за счет поперечной подачи),  $U$  – вектор управляющих воздействий, связанный с поперечной подачей.

Поведение динамической системы (18) может рассматриваться как суперпозиция собственного движения системы и реакции на воздействия (управления  $U$  и отклонения формы  $Z$ ).

Для восстановления переменных в виде, соответствующем (17), необходимо построить «уравнение восстановления» – линейную комбинацию состояний (18), которая в данном случае будет иметь вид:

$$X_0 = D_0 \cdot Y_0, \quad (19)$$

где  $D_0$  – матрица, характеризующая состав оценок параметров пространства состояний и/или структуру их линейных комбинаций.

Недостатком модели (18),(19) является необходимость использования производных для характеристик отклонения форм заготовки и инструмента  $\dot{Z}_1$ . Эта особенность не является свойством применяемого аппарата пространства состояний или матричного описания характеристик, а проявляется непосредственно на уровне представлений (15).

Для преодоления этих трудностей видоизменим вектор состояния системы:

$$F = Y_0 - B_{02} \cdot Z_1, \quad (20)$$

Откуда непосредственно следует уравнение восстановления  $Y_0 = F + B_{02}Z_1$ .

Так как для любых совместных по форме матриц  $\alpha(t)$  и  $\beta(t)$  справедливо [8] соотношение  $\frac{d[\alpha(t) \cdot \beta(t)]}{dt} = \alpha(t) \frac{d\beta(t)}{dt} + \beta(t) \frac{d\alpha(t)}{dt}$ , производная  $Y_0$  имеет вид:

$$\dot{Y}_0 = \dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot Z_1 + B_{02} \cdot \dot{Z}_1. \quad (21)$$

С раскрытием блочных матриц, уравнение (18) можно переписать в виде:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_{01} \cdot Z_1 + B_{02} \cdot \dot{Z}_1 + C_0 \cdot U. \quad (22)$$

Подстановка в правую часть уравнения (23)  $Y_0$  из (21), приводит к результату:

$$\dot{Y}_0 = A_0[F + B_{02}Z_1] + B_{01}Z_1 + B_{02}\dot{Z}_1 + C_0U. \quad (23)$$

Из сравнения левых частей (22) и (24) следует:

$$\dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot Z_1 + B_{02} \cdot \dot{Z}_1 = A_0 \cdot [F + B_{02} \cdot Z_1] + B_{01} \cdot Z_1 + B_{02} \cdot \dot{Z}_1 + C_0 \cdot U.$$

После соответствующих преобразований и группировки, видоизмененное уравнение состояния, не содержащее  $\dot{Z}_1$ , и, следовательно, не требующее дифференцирования параметров форм, принимает выражение:

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + [A_0 \cdot B_{02} + B_{01} - \dot{B}_{02}] \cdot Z_1 + C_0 \cdot U. \quad (24)$$

Сравнение уравнения (24) для видоизмененного пространства состояний  $F$  и исходного соотношения (18) для пространства состояний  $Y_0$  позволяет рассматривать коэффициент в квадратных скобках как матрицу влияния отклонений форм детали и круга  $B_1$  для видоизмененного состояния. Если, кроме того, параметры  $B_{02}$  при моделировании могут быть приняты не зависящими от времени, то  $\dot{B}_{02} = 0$  и выражение (25) упрощается:

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + B_1 \cdot Z_1 + C_0 \cdot U. \quad (25)$$

Как системе дифференциальных уравнений (18), так и системе (25) соответствуют совпадающие с точностью до обозначений  $Y_0, \dot{Y}_0$  и  $F, \dot{F}$  системы

однородных линейных дифференциальных уравнений  $\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0$  и  $\dot{F} = A_0 \cdot F$ . Следовательно, системы (18) и (25) являются эквивалентными в смысле Ляпунова [9].

Оценка состояния  $X_0$  на основе результатов моделирования модифицированной системы (23) может быть восстановлена в состояниях (19) применением к результатам (25) преобразования (20):

$$X_0 = D_0 \cdot F + D_0 \cdot B_{02} \cdot Z_1. \quad (26)$$

Представление модуля динамики технологической системы (24) или (25) и (26) должно быть дополнено модулем (11), (12) характеристик отклонений формы инструмента, что позволяет представить соответствующие уравнения в виде блочно-матричном (клеточном) виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{F} \\ \dot{X}_\Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & B_1 \cdot D_\Phi \\ O_A & A_\Phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F \\ X_\Phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_B \\ B_\Phi \end{bmatrix} \cdot [O \quad w] + \begin{bmatrix} C_0 \\ O_C \end{bmatrix} \cdot U, \quad (27)$$

где  $O_A, O_B, O_C$  – нулевые клетки матриц соответствующей размерности, а уравнение наблюдений приобретает вид:

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} D_0 & D_0 \cdot B_{02} \cdot D_\Phi \\ O & D_{\Phi 1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F \\ X_\Phi \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Здесь  $\hat{X} = [\dot{x}_1 \quad x_1 \quad \dot{x}_2 \quad x_2 \quad \dot{y}_\Phi \quad y_\Phi]^T$ .

В дальнейшем для анализа детерминированных составляющих отклонений форм, то в соответствие с (2), (3), нужно учитывать периодические составляющие, путем их введения в вектор  $U$ .

### Список литературы

1. Братан С.М. Обеспечение качества и повышение стабильности обработки при чистовом и тонком шлифовании. Часть 1 //Резание и инструмент в технологических системах.- Меж.науч.тех.сб. - Харьков: ХГПУ, - 2005 - Вып. 68 - С. 34-39.
2. Братан С.М. Обеспечение качества и повышение стабильности обработки при чистовом и тонком шлифовании. Часть 2 //Резание и инструмент в технологических системах.- Меж.науч.тех.сб. - Харьков: ХГПУ, - 2005 - Вып. 69 - С. 7-13.
3. Братан С.М. Обеспечение качества и повышение стабильности обработки при чистовом и тонком шлифовании. Часть 3 //Резание и инструмент в технологических системах.- Меж.науч.тех.сб. - Харьков: ХГПУ, - 2005 - Вып. 69 - С. 13-20.
4. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979, 232 с.
5. Братан С.М. Вероятностный подход при имитационном моделировании электроэрозионного шлифования //Вестник СевГТУ: Сер. Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр. - Севастополь, 1997 - Вып.7.-С.140-144.
6. Братан С.М. Экспериментальные исследования случайных размерных параметров шлифовального круга и построение аналитических зависимостей для оценки влияния его рельефа на входные шумы операции шлифования //Нові матеріали і технології в металургії: Науковий журнал ЗДТУ, - Запоріжжя, - 2000 - Вып.1 - С. 83-86.
7. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975, 344 с.
8. Братан С.М., Новоселов Ю.К., Каинов Д.А. Оценка распределения длин стружек при чистовом и тонком шлифовании //Резание и инструмент в технологических системах.- Меж.науч.тех.сб.- Харьков: ХГПУ, - 2003 - Вып.64 - С. 31-36.
9. Братан С.М. Синтез подсистемы наблюдений для операции плоского шлифования //Високі технології в машинобудуванні. Зб. наук. праць ХДПУ, -Харків, 2000 - Вип. 1(3) - С. 22-31.