

К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина

СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИЕМОСДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВС

Снижение влияния ошибок измерений на достоверность результатов приемосдаточных испытаний ДВС достигается моделированием зависимостей между нестационарными процессами изменения значений их диагностических параметров и построением адаптивного дискретного фильтра.

Ключевые слова: ДВС, приемосдаточные испытания, диагностические параметры, моделирование, дискретный фильтр.

Для отечественного серийного производства двигателей внутреннего сгорания (ДВС) задача повышения эффективности технологического процесса приемосдаточных испытаний остается по-прежнему актуальной [1]. Постоянный рост требований к качеству, надежности и конкурентоспособности отечественных двигателей, с одной стороны, и необходимость снижения затрат на их производство, с другой стороны, определяют необходимость повышения точности и достоверности результатов испытаний без значительных капитальных вложений. Решение задачи может быть достигнуто на основе разработки и применения современных методов управления испытаниями и перспективных технологий анализа измерительной информации.

К настоящему времени существует большое число методов анализа измерительной информации (например, [2]), однако трудно указать методы, которые могут быть использованы в серийном производстве для достижения указанных целей.

Основной и наиболее сложной задачей приемосдаточных испытаний ДВС является достоверное определение в течение короткого интервала времени значений величин структурных параметров, характеризующих техническое состояние двигателей, по результатам измерения ограниченного множества диагностических параметров, которые функционально зависят от структурных. Решение этой зада-

чи во многом определяется адекватностью используемых математических моделей измерительной информации и точностью проводимых измерений.

Целью данной работы является снижение влияния ошибок измерений на достоверность результатов приемосдаточных испытаний, полученных использованием эмпирических моделей, описывающих зависимости между нестационарными процессами изменения значений диагностических параметров ДВС, и адаптивного дискретного фильтра.

Алгоритм получения таких зависимостей подробно описан в работах [3-6, 8]. Значения диагностических параметров являются случайными. Последовательности результатов их измерения в равноотстоящие моменты времени представляют нестационарные дискретные случайные процессы даже при работе двигателей на установившихся режимах. Моделирование таких процессов традиционными статистическими методами приводит к большим погрешностям, которые могут быть уменьшены современными методами статистического анализа и адаптивной фильтрации. Для этого формируется случайный 1×1 -вектор $x_t = (X_{1,t}, \dots, X_{k,t}, \dots, X_{l,t})^T$, в каждый момент времени t содержащий значения l параметров, $k = 1 \div l$ – номер параметра. Упорядоченные по времени последовательности, или скалярные случайные процессы, изменения диагностических параметров образуют единый многомерный случайный процесс. Между отдельными элементами многомерного процесса определяются зависимости, которые для исправных объектов имеют характер случайных, но стационарных, линейных комбинаций.

Так, например, для ДВС МеМз – 3071 крутящий момент M_k , наиболее информативный, но сложно измеримый параметр, характеризующий динамические свойства двигателей, связан с давлением воздуха во впускном коллекторе P_a и часовым расходом топлива G_t стационарной зависимостью:

$$M_{k_t} = 1.37 \cdot P_{a_t} + 3.22 \cdot G_{t_t} - 42.38 + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где ε_t – нормально распределенная ошибка моделирования с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией.

Измеренные в ходе испытаний значения крутящего момента позволяют оценить значения механических потерь в сопряжениях

новых деталей, определить качество сборки основных механизмов, а так же способность нового двигателя выполнять свои функции в условиях будущей эксплуатации. Однако из-за необходимости сокращения затрат на проведение испытаний в отечественном производстве измерения значений крутящего момента на этапе приемосдаточных испытаний не проводят. В этих условиях требуемые для достоверной оценки технического состояния ДВС значения крутящего момента могут быть рассчитаны по зависимости (1), алгоритм получения которой детально описан в [5].

При определении коэффициентов модели (1) предполагалось, что значения крутящего момента M_k в левой части уравнения могут содержать ошибки, тогда как значения параметров P_a и G_t , стоящих в правой части – нет. Однако в условиях производственных стендовых испытаний очень сложно обеспечить безошибочные измерения значений P_a и G_t . Поэтому должны быть предусмотрены способы снижения влияния ошибок измерений на достоверность результатов вычисления значений M_k по уравнению (1) и, как следствие, на результаты приемосдаточных испытаний в целом.

Вычислительный эксперимент проведен по результатам испытаний малолитражных инжекторных двигателей модельного ряда МеМз – 3071 с помощью ППО RATS [9] и Maple V. Измерения параметров проводились на обкаточно-тормозном стенде с использованием рычажно-весовых устройств и датчиков проволоочного типа. Интервал между измерениями составлял 7,5 секунд и рассчитывался, исходя из быстродействия измерительных устройств и теоремы Котельникова.

Если диагностические параметры ДВС измерены с допустимой погрешностью (не более 0,5% для значений P_a и G_t и не более 4% для значений M_k по ГОСТ 14846) (рис.1,2), то отклонение расчетных значений крутящего момента от измеренных значений не превышает 1,2% (рис.3).

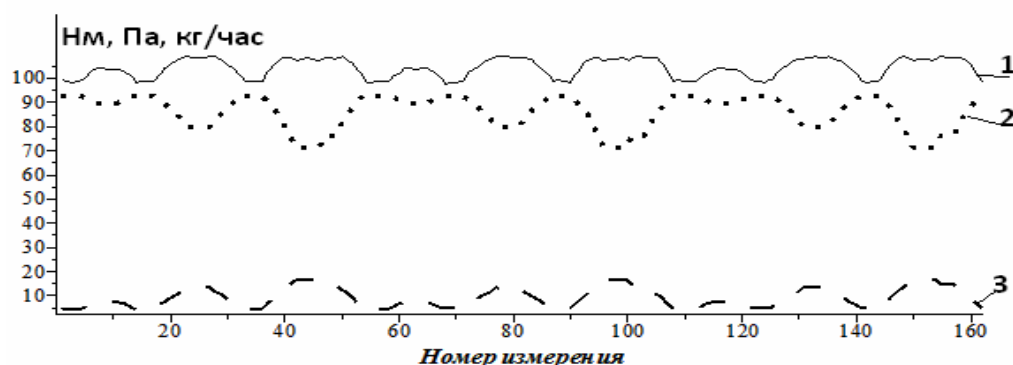


Рисунок 1 – Измерительные последовательности диагностических параметров ДВС: 1 – крутящий момент, Нм, 2 – давление воздуха во впускном коллекторе, Па, 3 – часовой расход топлива, кг/час

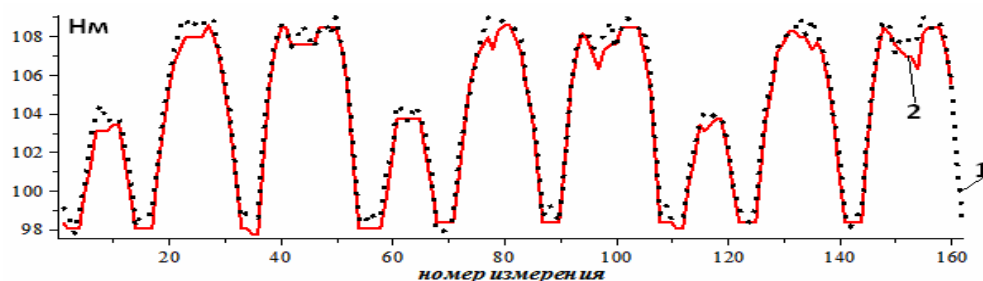


Рисунок 2 – Расчетные (2) и измеренные (1) значения крутящего момента ДВС

Отклонение расчетных значений крутящего момента от измеренных значений характеризует относительная ошибка:

$$\varepsilon_t = \frac{Mk_t^u - Mk_t^r}{Mk_t^u} \cdot 100\% \quad (2)$$

где Mk_t^u – измеренное значение крутящего момента, Mk_t^r – расчетное значение крутящего момента.

Отклонения случайны, независимы, распределены по закону, близкому к нормальному, а выборочные средние значения быстро устремляются к нулю (рис. 4, 5). Это подтверждает адекватность уравнения (1) измерительной информации и возможность его использования для оценки динамических показателей ДВС.

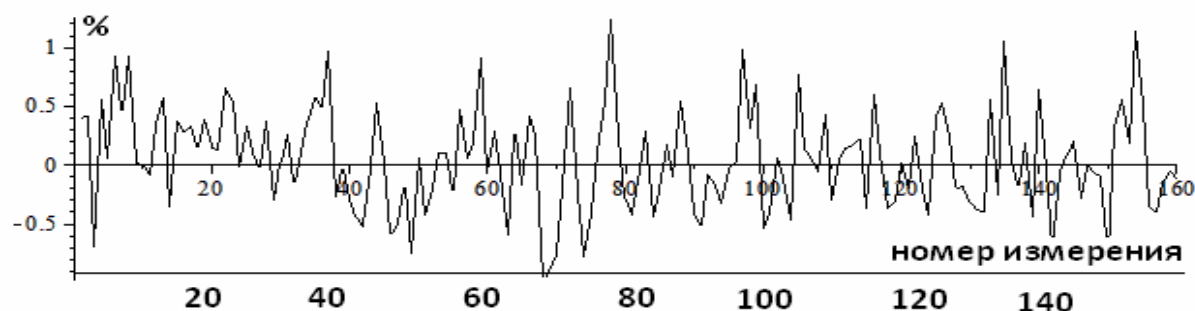


Рисунок 3 – Относительные ошибки моделирования значений крутящего момента

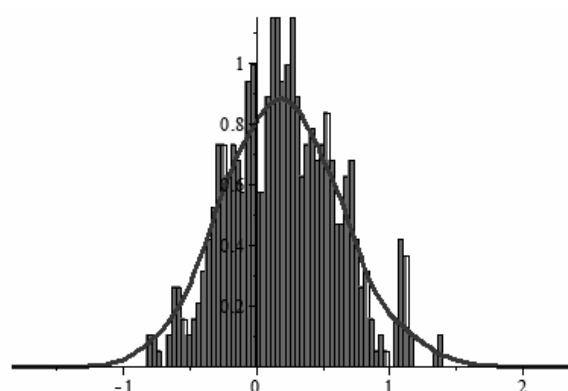


Рисунок 4 – Распределение значений ошибок моделирования

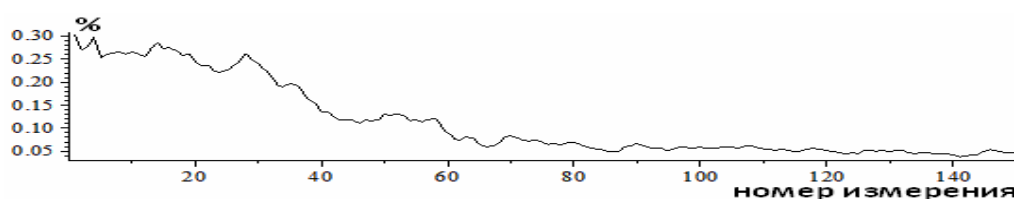


Рисунок 5 – Выборочные средние значения ошибок моделирования

Погрешности в результатах измерений, например, вызванные влиянием внешних факторов, погрешностями калибровок датчиков, а также преобразователей электрических сигналов в физические величины, приводят к отклонениям измеренных значений диагностических параметров от действительных (рис.6). Погрешности измерений представляют непрерывные случайные величины, как правило, распределенные по нормальному закону [7].

При появлении погрешностей измерений ошибки вычисления значений крутящего момента по уравнению (1) также увеличиваются (рис.7,8).

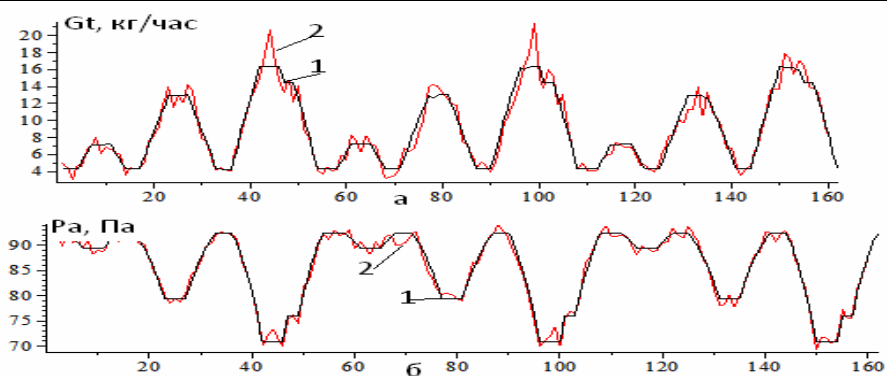


Рисунок 6 – Значения диагностических параметров, измеренные с погрешностью (2) и без погрешности (1): а – часовой расход топлива, б – давление воздуха во впускном коллекторе

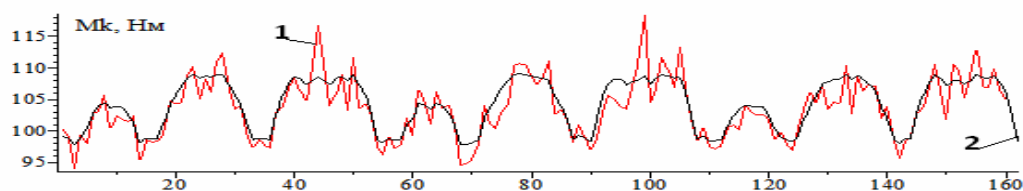


Рисунок 7 – Действительные (2) и расчетные (1) значения M_k при наличии погрешностей измерений

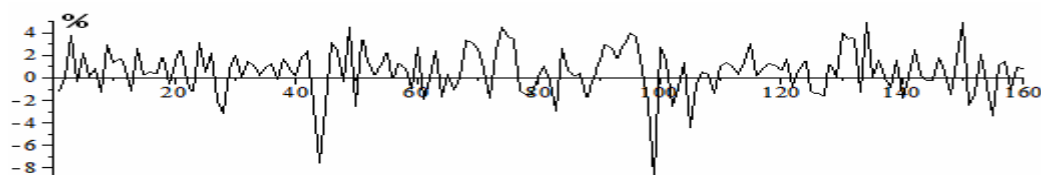


Рисунок 8 – Ошибки моделирования значений M_k при наличии погрешностей измерений

Изменение среднего значения ошибок моделирования, а также их распределение представлены на рис. 9, 10.

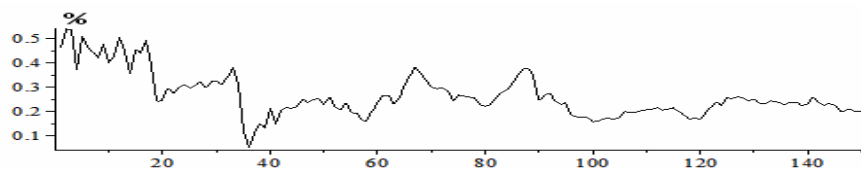


Рисунок 9 – Изменение среднего значения ошибок моделирования значений M_k при наличии ошибок в измерениях

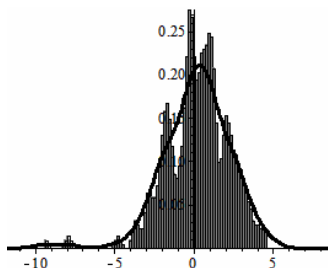


Рисунок 10 – Распределение ошибок моделирования значений M_k при наличии погрешностей измерений

Повышение точности вычисленных значений крутящего момента может быть достигнуто использованием адаптивного дискретного фильтра [8], построенного на основе информационного расхождения Кульбака-Лейблера между параметрами распределения истинного вектора состояния и его оценки и детально описанного, например, в [9].

Для этого модель (1) представлена в пространстве состояний:

$$x_t = A_0 + Ax_{t-1} + \omega_t, \quad (3)$$

$$y_t = Bx_t + v_t, \quad (4)$$

где $x_t = [M_k \quad P_a \quad G_t]^T$ – вектор (состояний), содержащий действительные значения диагностических параметров, y_t – вектор измеренных значений диагностических параметров, ω_t – внешние возмущения, $A_0 = [57,3 \quad -36,4 \quad 39,1]^T$,

$$A = \begin{bmatrix} 1,71 & -1,25 & -2,81 \\ -1,1 & 2,46 & 3,58 \\ 0,85 & -1,20 & -1,85 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{– матрицы коэффициентов,}$$

полученные построением модели векторной авторегрессии для вектора диагностических параметров. Ошибки измерений включены в уравнение (4).

Первые два уравнения алгоритма совпадают с аналогичными уравнениями оптимального дискретного фильтра Калмана:

$$\hat{x}_{t/t-1} = A_0 + A\hat{x}_{t-1}, \quad (5)$$

$$\hat{x}_{t/t} = \hat{x}_{t/t-1} + K_t \left(y_t - B\hat{x}_{t/t-1} \right). \quad (6)$$

Здесь $\hat{x}_{t/t-1}\sqrt{2}$ – априорная оценка вектора состояния x_t по наблюдениям $y_{t-1}, \dots, y_0$, $\hat{x}_{t/t}$ – апостериорная оценка x_t по наблюдениям $y_t, y_{t-1}, \dots, y_0$, $\left(y_t - B\hat{x}_{t/t-1}\right)$ – остаточные члены, или невязка; K_t – матрица коэффициентов. В отличие от фильтра Калмана, в используемом алгоритме матрица коэффициентов усиления K_t не содержит неизвестных вероятностных характеристик погрешностей и рассчитывается по формуле:

$$K_t = A\hat{\Sigma}_{t-1}A^TB \left[BA\hat{\Sigma}_{t-1}A^TB^T + T_t \right]^{-1}, \quad (6)$$

где T_t – выборочная ковариационная матрица вектора наблюдений, $\hat{\Sigma}_t$ – ковариационная матрица оценок вектора состояния.

Значения ковариационных матриц вектора наблюдений и оценок вектора состояния соответственно рассчитываются по формулам:

$$T_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((y_i - \bar{y}_i) \cdot (y_i - \bar{y}_i)^T \right), \quad \bar{y}_i = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i y_k, \quad (7)$$

$$\hat{\Sigma}_t = [I - K_t B] A \cdot \hat{\Sigma}_{t-1} A^T [I - K_t B]^T + K_t T_t K_t^T, \quad (8)$$

$\hat{x}_t = E[\hat{x}_t]$, $E[\cdot]$ – символ математического ожидания, I – единичная матрица. Фильтр (5)-(8) корректирует оценку вектора состояния по значению расхождения вероятностных характеристик оценки, полученной на предыдущем шаге оценивания, и истинного значения вектора состояния. В результате, снижается влияние погрешностей измерений на рассчитываемые по уравнению (1) значения крутящего момента. Эти значения и их отклонения от действительных значений параметров отражены графиками рис. 11 и 12.

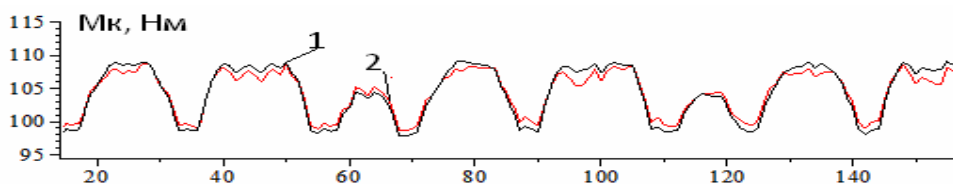


Рисунок 11 – Расчетные по сглаженным значениям диагностических параметров (2) и измеренные без погрешностей (1) значения M_k

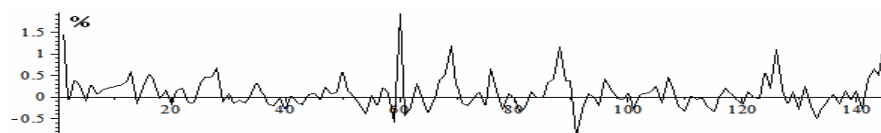


Рисунок 12 – Ошибки моделирования

Предложенный подход, позволяющий снизить влияние ошибок измерений на достоверности результатов приемосдаточных испытаний, предполагает статистическое моделирование процессов изменения значений информативных диагностических параметров ДВС, определение зависимостей между ними, и адаптивное оценивание значений диагностических параметров. Реализация указанных процедур не требует замены действующего контрольно-измерительного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко Е.А. Статистические методы диагностирования технического состояния автомобильных транспортных средств / Е.А. Павленко // Автомобильная промышленность. – 2009. – №7 – С 29 – 30.
2. Халавян А.А. Statistic 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. учеб. / А.А. Халавян. – М.: ООО «Бином-Пресс» – 2007 г. – 512 с.
3. Осипов К.Н. Контроль качества сборки ДВС на этапе приемосдаточных испытаний // К.Н. Осипов / сб. док. междунар. науч.-техн. семинара 20-21 октября 2011. г. Москва, 2011. – С.153 – 160.
4. Первухина Е.Л. Упрощение стохастических моделей в задачах оценки состояния машиностроительных изделий в ходе стендовых испытаний // Е.Л. Первухина, К.Н. Осипов, Т.Л. Степанченко / Системные технологии. Регіональний міжвузівський зб. наук. пр. – Випуск 2(73). – Дніпропетровськ, 2011. – С.153-159.
5. Первухина Е.Л. Обнаружение дефектов машиностроительных изделий в ходе приемосдаточных испытаний / Е.Л. Первухина, В.В. Голикова, К.Н. Осипов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – №5. – С. 97 – 105.
6. Осипов К.Н. Моделирование поршневых ДВС в ходе приемосдаточных испытаний по результатам измерений их диагностических параметров / К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина, Ю.Л. Рапацкий // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – №2. – С. 130 – 134.
7. Маркин Н.С. Основы теории обработки результатов измерений / Н.С. Марков. – М.: Стандарт, 1991 г. – 176 с.
8. Голикова В.В. Оценка качества сборки двигателей внутреннего сгорания в ходе приемосдаточных испытаний / В.В. Голикова, К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина // Вестник КузГТУ. науч.-техн. журнал – 2010. – №6. – С 40 – 45.
9. Pervukhina, E., Emmenegger J.-F. Adaptive time series filters obtained by minimization of the Kullback-Leibler divergence criterion // International Journal of Applied Mathematics, 2005. – Vol. 17. – № 1. – P.69-89.
10. Doan T.A. RATS Software Package, User's Manual, Version 8.0. / T.A. Doan. – Illinois: ESTIMA, 2010. – 550 p.

С.В. Хорошилов

ОБ АЛГОРИТМИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. ЧАСТЬ 2

Анотація. Позначено ряд важливих задач, які необхідно вирішувати при створенні системи керування орієнтацією сонячної космічної електростанції. Представлено методичне забезпечення для оцінки впливу дисипативних і пружних характеристик конструкції на стійкість об'єкта керування, аналізу спостережливості і керованості при неповному векторі стану, а також синтезу алгоритмів керування орієнтацією електростанції робастних стосовно ряду невизначеностей, що може бути основою при створенні алгоритмічного забезпечення системи керування орієнтацією електростанції.

В настоящей статье продолжены исследования, выполненные в работе [1], где рассмотрены наиболее важные задачи, которые необходимо будет решать при создании системы управления ориентацией солнечных космических электростанций (СКЭС), а именно, математическое описание упругих СКЭС, редукция размерности уравнений динамики станции, оценка диссипативных и упругих характеристик ее конструкции. Здесь рассматриваются учет влияния упругих и диссипативных параметров на устойчивость объекта управления, вопросы наблюдаемости и управляемости при неполном векторе состояния, а также синтез алгоритмов управления ориентацией электростанции, робастных по отношению к ряду неопределенностей.

При построении системы управления СКЭС целесообразно предъявить определенные требования к конструкции электростанции. Важными параметрами конструкции станции, с точки зрения ее управления, являются степень жесткости и степень демпфирования ее колебаний [2]. Правильность выбора этих параметров может быть оценена следующим образом.

Воспользуемся линеаризованной математической моделью системы в упрощенном виде (каналы управления не взаимосвязаны). Та-

кая модель позволяет исследовать динамику станции в одной плоскости движения. Для такого случая блок схема приведена на рис. 1 [3].

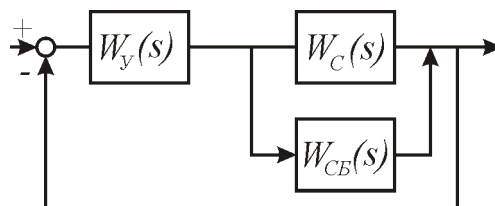


Рисунок 1 - Упрощенная блок схема одного канала управления ориентацией станции

Передаточная функция жесткой станции имеет вид

$$W_c(S) = \frac{1}{J_1 S^2}, \quad (1)$$

передаточная функция упругой солнечной батареи может быть представлена так:

$$W_{св}(S) = \sum_{j=1}^n \frac{K_j}{S^2 + 2\varepsilon_j S + \Omega_j^2}, \quad (2)$$

а передаточная функция управляющего устройства записана в форме

$$W_y(S) = K_y + K_{\Pi} S + \frac{K_{\text{И}}}{S}. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) использованы следующие обозначения: J_1 – момент инерции станции относительно рассматриваемой оси вращения; K_y , K_{Π} , $K_{\text{И}}$ – коэффициенты усиления, связанные с ошибкой ориентации, ее производной и интегралом соответственно; S – оператор Лапласа; Ω_j , ε_j – собственная частота и декремент колебаний солнечной батареи по j -му тону.

Передаточная функция системы, блок-схема которой приведена на рис.1, при разомкнутой цепи обратной связи равна

$$W(S) = W_y(S) [W_c(S) + W_{св}(S)].$$

Передаточная функция такой системы при замкнутой цепи обратной связи определяется таким образом

$$W_3 = \frac{W(S)}{1 + W(S)}.$$

С учетом одной формы собственных колебаний передаточную функцию системы можно записать так:

$$W(S) = \frac{(a_{\Pi}S^2 + a_yS + a_{\Pi})[(1 + a_1)S^2 + 2\varepsilon_1S + \Omega_1^2]}{S^3(S^2 + 2\varepsilon_1S + \Omega_1^2)}, \quad (4)$$

где $a_{\Pi} = \frac{K_{\Pi}}{J_1}$, $a_y = \frac{K_y}{J_1}$, $a_{\Pi} = \frac{K_{\Pi}}{J_1}$, $a_1 = K_1J_1$.

Характеристическое уравнение для рассматриваемого случая можно записать в форме

$$\sum_{k=0}^5 f_k S^k = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} f_0 &= a_{\Pi}\Omega_1^2, \quad f_1 = 2a_{\Pi}\varepsilon_1 + a_y\Omega_1^2, \quad f_2 = 2a_y\varepsilon_1 + a_{\Pi}\Omega_1^2 + a_{\Pi}(a_1 + 1), \\ f_3 &= 2a_{\Pi}\varepsilon_1 + \Omega_1^2 + a_y(a_1 + 1), \quad f_4 = 2\varepsilon_1 + a_{\Pi}(a_1 + 1), \quad f_5 = 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Параметры, входящие в (6), можно выразить через величину η , характеризующую степень устойчивости системы, в виде

$$a_{\Pi} = 3\eta, \quad a_y = 5,46\eta^2, \quad a_{\Pi} = 5,46\eta^3.$$

Для исследования системы на устойчивость может быть использован критерий Гурвица. На основании этого критерия необходимым и достаточным условием устойчивости системы является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения (5) и всех определителей матрицы, составленной по определенному правилу [4]. Для характеристического уравнения (5), раскрывая определители, получим два условия

$$f_1f_2 - f_0f_3 > 0, \quad (f_1f_2 - f_0f_3)(f_3f_4 - f_2) - (f_1f_4 - f_0)^2 > 0. \quad (7)$$

Нетрудно видеть из (6), что условие положительности всех коэффициентов уравнения (5) при $\varepsilon_1 > 0$ выполняется всегда. Следовательно, для контроля устойчивости системы достаточно проверить выполнение неравенств (7).

На рис. 2 приведены области устойчивости на плоскости параметров $\varepsilon_1 - \Omega_1$ для $\eta = 1$. На этом рисунке кривые 1, 2, 3 ограничивают области устойчивости, построенные для a_1 , равного 50, 100 и 150 соответственно. Из рисунка видно, что с ростом a_1 область неустойчивости увеличивается.

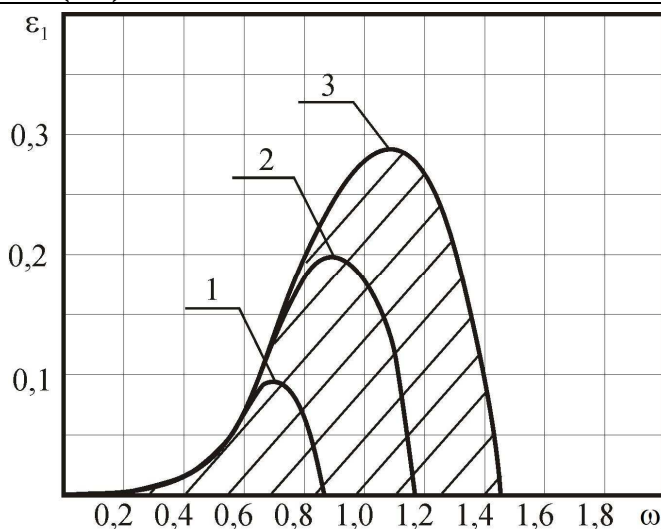


Рисунок 2 - Области устойчивости на плоскости параметров $\varepsilon_1 - \Omega_1$ для $\eta = 1$.

С использованием критерия Гурвица могут быть получены условия устойчивости для большего количества форм, аналогичные условиям (7). В таком случае методика исследования устойчивости является итерационной. Сначала исследуется на устойчивость характеристическое уравнение, учитывающее только первую форму колебаний. После того, как построены области устойчивости на плоскости параметров $\varepsilon_1 - \Omega_1$, выбираются значения ε_1 , Ω_1 , a_1 . Для выбранных параметров ε_1 , Ω_1 , a_1 строятся области устойчивости на плоскости параметров $\varepsilon_2 - \Omega_2$. Полученные области устойчивости позволяют выбрать значения параметров ε_2 , Ω_2 , a_2 , соответствующие второй форме колебаний. Процедуру можно продолжить для произвольного количества форм колебаний.

Для синтеза законов управления математическую модель СКЭС целесообразно представить в нормальной форме. После линеаризации уравнение динамики СКЭС может быть записано следующим образом:

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X} + B\bar{U}, \quad (8)$$

а уравнение измерителей представлено в виде

$$\bar{Y} = C\bar{X},$$

где $\bar{X}$ – вектор состояния системы; $\bar{U}$ – вектор управления; $\bar{Y}$ – вектор выходных координат; A , B , C – постоянные матрицы.

На практике не все компоненты вектора состояния доступны для измерения, потому что число измерительных устройств ограни-

чено, кроме того, часть переменных вектора состояния затруднительно измерить.

Опираясь на знание векторов $\bar{Y}(t)$, $\bar{U}(t)$ и матриц A , B , C , необходимо оценить вектор состояния объекта $\tilde{X}(t)$. Оценка вектора состояния $\tilde{X}$ может быть получена таким образом:

$$\dot{\tilde{X}} = A\tilde{X} + B\bar{U}. \quad (9)$$

Недостаток оценки в соответствии с уравнением (9) состоит в том, что она действует по разомкнутому циклу и со временем ошибка оценки $\bar{X}(t)$ накапливается. Для устранения этого недостатка в уравнение контура оценки вектора состояния вводится еще один член

$$\dot{\tilde{X}} = A\tilde{X} + B\bar{U} + KC(\bar{X} - \tilde{X}), \quad (10)$$

где K – постоянная матрица

Численно решив уравнение (10), получим оценку вектора состояния $\tilde{X}(t)$, которая используется при формировании управления

$$\bar{U}(t) = -L\tilde{X},$$

где L – постоянная матрица.

Задача управления объектом с неполной информацией сводится к исследованию системы (4) на наблюдаемость и управляемость и синтезу контура оценки состояния.

Как показал Калман [5], проверка условия наблюдаемости сводится к определению ранга коагулированной матрицы

$$Q_n = \begin{bmatrix} C^T : A^T C^T : (A^T)^2 C^T : \dots : (A^T)^{n-1} C^T \end{bmatrix}.$$

Для выполнения условия наблюдаемости ранг этой матрицы должен быть равен порядку исследуемой системы n . Эквивалентный критерий наблюдаемости формулируется следующим образом. Система (8) наблюдаема тогда и только тогда, когда система

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X}, \quad C\bar{X} = 0$$

имеет единственное решение $\bar{X} = 0$.

Условием полной управляемости системы (8) является равенство ранга матрицы управляемости

$$Q_y = \begin{bmatrix} B : AB : A^2 B : \dots : A^{n-1} B \end{bmatrix}$$

порядку системы n . Эквивалентный критерий управляемости: система (8) управляема тогда и только тогда, когда система

$$\dot{\bar{X}} = A^T \bar{X}, \quad B^T \bar{X} = 0$$

имеет единственное решение $\bar{X} = 0$.

Для уменьшения громоздкости аналитических выражений рассмотрим линеаризованную систему уравнений, описывающую динамику станции, без учета внешних возмущений для одного канала управления в следующем виде:

$$\ddot{\phi}_1 + \sum_{i=1}^n b_i \ddot{q}_i = U_1, \quad \ddot{q}_i + \varepsilon_i \dot{q}_i + d_i q_i + \ddot{\phi}_1 = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где ϕ_1 – угловая координата движения станции в одном канале управления; q_i – координаты, характеризующие деформации упругого элемента конструкции; b_i , c_i , ε_i – постоянные коэффициенты; U_1 – управляющий момент.

Для преобразования системы уравнений (11) к виду (8) представим вектор состояния $\bar{X}$ следующим образом:

$$\bar{X} = [x_1, x_2, \dots, x_{2n+2}]^T,$$

где $x_{n+1} = q_1, \dots, x_{2n} = q_n, x_{n+1} = \dot{q}_1, \dots, x_{2n} = \dot{q}_n, x_{2n+1} = \phi_1, x_{2n+2} = \dot{\phi}_1$.

В рассматриваемом случае измеренными могут быть ϕ_1 , $\dot{\phi}_1$. Деформации панели измерению не подлежат.

Измерения могут быть трех типов:

1) $y_1 = x_{2n+1}$; 2) $y_1 = x_{2n+1}, y_2 = x_{2n+2}$; 3) $y_2 = x_{2n+2}$.

Уравнение $S\bar{X} = 0$ для каждого случая можно расписать в виде

1) $\phi_1 = 0$, отсюда $\dot{\phi}_1 = \ddot{\phi}_1 = 0$;

2) $\phi_1 = \dot{\phi}_1 = 0$, отсюда $\ddot{\phi}_1 = 0$;

3) $\dot{\phi}_1 = 0$, отсюда $\ddot{\phi}_1 = 0, \phi_1 \neq 0$.

Для случая 3, так как $\phi_1 \neq 0$, то условие $\bar{X} = 0$ не выполняется. Поэтому измерение только угловой скорости $\dot{\phi}$ недостаточно для создания устойчивого регулятора системы.

С целью исследования на наблюдаемость для случаев 1 и 2 запишем однородную систему уравнений для системы (11) с учетом того, что $\ddot{\phi}_1 = 0$, в таком виде

$$\sum_{i=1}^n b_i \ddot{q}_i = 0, \quad (12)$$

$$\ddot{q}_i + \varepsilon_i \dot{q}_i + c_i x_i = 0. \quad (13)$$

Характеристическое уравнение, соответствующее уравнениям (12-13), имеет решение

$$P_{1,2} = -\frac{\varepsilon_i}{2} \pm \sqrt{\frac{c_i^2}{4} - c_i}.$$

Введем обозначения $e_i = -\frac{\varepsilon_i}{2}$, $\omega_i = \sqrt{\frac{\varepsilon_i^2}{4} - c_i}$ и рассмотрим три случая:

- а). $c_i > \frac{\varepsilon_i^2}{4}$, то есть ω_i мнимое число;
- б). $c_i = \frac{\varepsilon_i^2}{4}$, то есть $\omega_i = 0$;
- в). $c_i < \frac{\varepsilon_i^2}{4}$, корни вещественные, разные $e_i^{(1)}$, $e_i^{(2)}$.

Исследования, проведенные в работах [6–7], показали, что для рассмотренных случаев измерений необходимыми условиями наблюдаемости системы (11) является $b_i \neq 0$ $i = 1, 2, \dots, n$, то есть упругие деформации должны оказывать влияние на движение объекта. Достаточные условия записываются следующим образом.

Система наблюдаема для $i \neq j = 1, 2, \dots, n$ при выполнении условий

$$1) \ c_i > \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i^2 + \omega_i^2 \neq 0; \text{ а) } e_i = e, \ \omega_i \neq \omega_j; \text{ б) } e_i \neq e_j, \ \omega_i = \omega \text{ либо}$$

$$\omega_i \neq \omega_j;$$

$$2) \ c_i = \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i \neq e_j;$$

$$3) \ c_i < \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i^{(1)} \neq e_j^{(1)}, \ e_i^{(2)} \neq e_j^{(2)}$$

и ненаблюдаема, если

$$1) \ c_i > \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i = e, \ \omega_i = \omega;$$

$$2) \ c_i = \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i = e;$$

$$3) \ c_i < \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i^{(1)} = e_j^{(1)}, \ e_i^{(2)} = e_j^{(2)}.$$

На практике демпфирование упругих колебаний за счет рассеивания энергии в материале мало. Поэтому, так как $c_i \gg \varepsilon_i$, можно предположить, что $\varepsilon_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$. В этом случае необходимыми и достаточными условиями наблюдаемости будут

$$b_i \neq 0, \ \omega_i \neq 0, \ \omega_i \neq \omega_j, \ i = 1, 2, \dots, n.$$

То есть частоты упругих колебаний панели не должны быть одинаковыми.

Проведенные исследования показали, что система (11) управляема во всех случаях, кроме:

$$\text{при } c_i > \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \text{ если } e_i = e, \ \omega_i = \omega;$$

$$\text{при } c_i = \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \text{ если } e_i = e_j;$$

$$\text{при } c_i < \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \text{ если } e_i^{(1)} = e^{(2)}, \ i \neq j = 1, 2, \dots, n.$$

Учитывая, что на практике $c_i \gg \varepsilon_i$ и предполагая, что $\varepsilon_i = 0$ $i = 1, 2, \dots, n$, то есть необходимым и достаточным условием управляемости является $\omega_i \neq \omega_j$, где $i \neq j = 1, 2, \dots, n$, то есть разнесение частот упругих колебаний.

Рассмотрим синтез регулятора при учете одной формы упругих колебаний и использование датчика углового отклонения в качестве единственного измерительного устройства. В таком случае матрицы A , KC и вектор B , входящие в уравнения (4), принимают вид

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad KC = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_{13} & 0 \\ 0 & 0 & K_{23} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = [0, \ -1, \ 0, \ 1]^T,$$

$$\bar{L} = [l_1, \ l_2, \ l_3, \ l_4]^T,$$

где $a_{21} = -c_1^*$, $a_{22} = -e_1^*$, $a_{41} = b_1 c_1^*$, $a_{42} = b_1 e_1^*$, $c_1^* = c_1/b^*$, $e_1^* = e_1/b^*$, $b^* = 1 - b_1$.

Для определения коэффициентов K_{i3} составим многочлен

$$f_1(\lambda) = \det(A - KC - \lambda E), \quad (14)$$

а для определения элементов l_i - многочлен

$$f_1(\lambda) = \det(A - BL - \lambda E), \quad (15)$$

где E - единичная матрица.

Многочлены (14) и (15) могут быть представлены в общем виде

$$f(\lambda) = \lambda^4 + a_3\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0.$$

Коэффициенты K_{i3} выразим следующим образом:

$$K_{13} = \frac{a_{41}p_1 - a_{42}p_2}{a_{41}^2 - (a_{21}a_{42} - a_{22}a_{41})a_{42}}, \quad K_{23} = \frac{a_{41}p_2 - (a_{21}a_{42} - a_{22}a_{41})p_1}{a_{41}^2 - (a_{21}a_{42} - a_{22}a_{41})a_{42}},$$

$$K_{33} = a_3 + a_{22}, \quad K_{43} = a_2 + a_{22}(a_3 + a_{22}) + a_{21},$$

где $p_1 = a_1 + a_{21}(a_3 + a_{22}) + a_{22}[a_2 + a_{22}(a_3 + a_{22}) + a_{21}]$,

$p_2 = a_0 + a_{21}[a_2 + a_{22}(a_3 + a_{22}) + a_{21}]$.

Аналогично запишем и коэффициенты l_i

$$l_1 = \frac{a_0}{a_{21} + a_{41}} - a_2 + \frac{a_{22} + a_{42}}{a_{21} + a_{41}} \left[a_1 - \frac{a_0(a_{22} + a_{42})}{a_{21} + a_{41}} \right] - a_{21},$$

$$l_2 = \frac{1}{a_{21} + a_{41}} \left[a_1 - \frac{a_0(a_{22} + a_{42})}{a_{21} + a_{41}} \right] - a_{22} - a_3,$$

$$l_3 = -\frac{a_0}{a_{21} + a_{41}}, \quad l_4 = \frac{1}{a_{21} + a_{41}} \left[-a_1 + \frac{a_0(a_{22} + a_{42})}{a_{21} + a_{41}} \right].$$

Для обеспечения устойчивости и требуемых качеств системы (11) выберем корни характеристического уравнения, используя правило Баттерворта. В таком случае значения корней определяются выражениями

$$a_0 = \omega_0^4, \quad a_1 = 2,6\omega_0^3, \quad a_2 = 3,4\omega_0^2, \quad a_3 = 2,6\omega_0,$$

где ω_0 - параметр, характеризующий быстроту протекания переходного процесса.

Следует отметить, что на практике сложно избежать неточностей при создании математических моделей. Так динамические характеристики СКЭС точно неизвестны, возмущающие моменты сложным образом зависят от различных факторов. В связи с этим система

управления должна обладать робастностью по отношению к этим неопределенностям.

В работе [8] такая задача решается путем оценки вектора неопределенности с помощью робастного наблюдателя с последующей его компенсацией регулятором. Следуя результатам этой работы систему уравнений, описывающую вращательное движения СКЭС, можно представить следующим образом:

$$\dot{\bar{\mathbf{J}}}\bar{\boldsymbol{\Theta}} + \bar{\mathbf{J}}\dot{\bar{\boldsymbol{\Theta}}} + \bar{\mathbf{G}}^T\ddot{\bar{\mathbf{q}}} + \bar{\boldsymbol{\Theta}} \times (\bar{\mathbf{J}}\bar{\boldsymbol{\Theta}} + \mathbf{G}^T\dot{\bar{\mathbf{q}}}) = \bar{\mathbf{M}}_B + \bar{\mathbf{M}}_y, \quad (16)$$

$$\bar{\mathbf{G}}\dot{\bar{\boldsymbol{\Theta}}} - 0,5 \frac{\partial}{\partial \bar{\mathbf{q}}} (\bar{\boldsymbol{\Theta}}^T \bar{\mathbf{J}}) \bar{\boldsymbol{\Theta}} + \mathbf{M}_e (\ddot{\bar{\mathbf{q}}} + \mathbf{D}\Omega\dot{\bar{\mathbf{q}}} + \Omega^2\bar{\mathbf{q}}) = \bar{\mathbf{Q}}, \quad (17)$$

где $\bar{\mathbf{J}}$ – тензор инерции СКЭС; $\bar{\boldsymbol{\Theta}}$ – вектор абсолютной угловой скорости станции; $\bar{\mathbf{G}}$ – коэффициент влияния движения станции на упругие деформации; $\mathbf{M}_e$ – диагональная матрица присоединенных масс упругих элементов; Ω – диагональная матрица собственных частот упругих элементов; $\mathbf{D}$ – матрица демпфирования упругих колебаний; $\bar{\mathbf{Q}}$ – вектор внешних воздействий на упругие элементы; $\bar{\mathbf{M}}_B$ – вектор внешних воздействий на станцию; $\bar{\mathbf{M}}_y$ – вектор управления станцией.

Тензор инерции станции можно представить в виде

$$\bar{\mathbf{J}} = \bar{\mathbf{J}}_0 + \bar{\mathbf{J}}_\Delta + \bar{\mathbf{J}}_\delta,$$

где $\bar{\mathbf{J}}_\delta$ – приращение матрицы $\bar{\mathbf{J}}$ за счет упругих деформаций; $\bar{\mathbf{J}}_0$ – диагональная матрица, составленная из расчетных значений матрицы $\bar{\mathbf{J}}$; $\bar{\mathbf{J}}_\Delta$ – учитывает недиагональные элементы и погрешности знания диагональных элементов $\bar{\mathbf{J}}_0$.

Введем вектор неопределенности

$$\bar{\mathbf{Z}} = \bar{\mathbf{M}}_B - \dot{\bar{\mathbf{J}}}\bar{\boldsymbol{\Theta}} - (\bar{\mathbf{J}}_\Delta + \bar{\mathbf{J}}_\delta)\dot{\bar{\boldsymbol{\Theta}}} - \bar{\mathbf{G}}^T\ddot{\bar{\mathbf{q}}} - \bar{\boldsymbol{\Theta}} \times [(\bar{\mathbf{J}}_\Delta + \bar{\mathbf{J}}_\delta)\bar{\boldsymbol{\Theta}} + \bar{\mathbf{G}}^T\dot{\bar{\mathbf{q}}}] \quad (18)$$

С учетом (18) уравнение (17) принимает вид

$$\bar{\mathbf{J}}_0\dot{\bar{\boldsymbol{\Theta}}} + \bar{\boldsymbol{\Theta}} \times \bar{\mathbf{J}}_0\bar{\boldsymbol{\Theta}} - \bar{\mathbf{M}}_y = \bar{\mathbf{Z}}. \quad (19)$$

Считая, что вектор $\bar{\mathbf{Z}}$ непрерывен во времени и на коротких интервалах можно считать $\bar{\mathbf{Z}} = \text{const}$, и обозначив измерение этого вектора через y_z для динамического уравнения $\dot{\bar{\mathbf{Z}}} = 0$ можно построить наблюдатель в виде

$$\dot{\tilde{Z}} = L_z (\tilde{Z} - \bar{y}_z), \quad (20)$$

где $\tilde{Z}$ – оценка вектора $\bar{Z}$.

В качестве измерения $\bar{y}_z$ может выступать левая часть уравнения (18). Подставляя ее в (20), получим

$$\dot{\tilde{Z}} = L_z (\tilde{Z} - \bar{J}_0 \dot{\bar{\Theta}} - \bar{\Theta} \times \bar{J}_0 \bar{\Theta} + \bar{M}_y).$$

Введем новый вектор $\bar{R}$

$$\dot{\bar{R}} = \bar{L}_z (\bar{R} - \bar{L}_z \bar{J}_0 \dot{\bar{\Theta}} - \bar{\Theta} \times \bar{J}_0 \bar{\Theta} + \bar{M}_y).$$

Таким образом, для оценки вектора $\bar{Z}$ необходимо знание только $\bar{\Theta}$.

Пусть $\bar{M}_y = -(\bar{U}_0 + \tilde{Z})$. В таком случае закон управления и уравнение (19) принимают вид

$$\bar{U} = -(\bar{U}_0 + \tilde{Z}),$$

$$\bar{J}_0 \dot{\bar{\Theta}} + \bar{\Theta} \times \bar{J}_0 \bar{\Theta} = -\bar{U}_0 - \tilde{Z} + \bar{Z}.$$

Для простоты рассмотрим плоское движение (по одному из каналов управления) с учетом одного тона упругих колебаний. Уравнения (16-17) примут вид

$$J\ddot{\phi} + G^T \ddot{q} = M_b + M_y,$$

$$G\ddot{\phi} + M(\ddot{q} + D\Omega\dot{q} + \Omega^2 q) = Q,$$

$$\tilde{Z} = R - L_z J_0 \dot{\phi}, \quad \dot{R} = L_z (R - L_z J_0 \dot{\phi} - M_y),$$

$$U = U_0 + R - L_z J_0 \dot{\phi}, \quad U = U_0 + \tilde{Z}.$$

Здесь все переменные и коэффициенты являются скалярами.

Зададим M_y в форме

$$M_y = K_1 \phi + K_2 \dot{\phi},$$

Характеристическое уравнение для этого случая имеет вид

$$\left[(Js^2 + K_2s + K_1)s - L_z (J_0s^2 + K_2s + K_1) \right] M(s^2 + D\Omega s + \Omega^2) - H^2 s^5 = 0.$$

Возможны различные сочетания параметров системы управления. Рассмотрим следующие случаи: а) упругие колебания являются быстрыми по отношению к остальным движениям системы; б) работа наблюдателя и упругие колебания являются быстрыми по сравнению

с движением жесткой станции; в) быстрым является процесс в наблюдателе, медленными упругие колебания и движение жесткой станции.

Для этих случаев можно констатировать следующее:

1. При достаточно больших L_z и $L_z < 0$; $D, K_1, K_2 > 0$ система будет робастно устойчивой по отношению к разбросу, как инерционных характеристик станции, так и по отношению к параметрам ее упругости. Более того, система будет сохранять асимптотическую устойчивость при любых значениях инерционных характеристик и параметрах упругости СКЭС.

2. При достаточно больших L_z система будет обладать робастной модальностью, то есть сохранять неизменными определяющие корни характеристического уравнения всей системы, которые определяются уравнением

$$J_0 p^2 + K_2 p + K_1 = 0. \quad (21)$$

3. В том случае, когда $\Omega < \infty$, $-\infty < L_z < 0$, система будет асимптотически устойчивой и при отсутствии конструкционного демпфирования упругих колебаний. Рассеяние энергии упругих колебаний будет происходить за счет наблюдателя.

4. Увеличение L_z при $L_z < 0$ помимо сказанного увеличивает точность системы по отношению к внешним системам.

5. Синтез системы управления сводится к оптимизации корней уравнений (21) и уравнения

$$(JM - H^2)p^3 + M(JD\Omega - L_z J_0)p^2 + M\Omega(J\Omega - L_z J_0 D)p - L_z J_0 M\Omega^2 = 0$$

второго и третьего порядка путем выбора коэффициентов K_1, K_2, L_z и расчетного значения J_0 .

Таким образом, в настоящей статье продолжено рассмотрение наиболее важных задач, которые необходимо будет решать при создании системы управления ориентацией СКЭС, начатое в работе [1]. Для таких задач, как влияние диссипативных и упругих характеристик конструкции на устойчивость объекта управления, наблюдаемость и управляемость при неполном векторе состояния, а также синтез алгоритмов управления ориентацией электростанции робастных по отношению к ряду неопределенностей, в обзорном стиле представлено методическое обеспечение, которое может служить основой

при создании алгоритмического обеспечения систем ориентации СКЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорошилов С.В. Об алгоритмическом обеспечении управления ориентацией солнечных космических электростанций. Часть 1 / С.В. Хорошилов // Системні технології. – Вып. 2(61). – 2009. – С. 153–167.
2. Хорошилов С.В. Особенности динамики деформируемых космических аппаратов в переходных и нештатных режимах движения / С.В. Хорошилов // Вісник Дніпропетровського університету. Ракетно-космічна техніка. – Вып. 3. – 1999. – С. 118–120.
3. Иванова Г.И. Определение требований к динамическим характеристикам деформируемых элементов движущихся механических систем / Г.И. Иванова, В.С. Хорошилов // Динамические задачи механики сложных систем. – 1984. – С. 76–81
4. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. М.: Наука, 1972. – 767 с.
5. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
6. Ткаченко В.А. Стабилизация углового положения космического аппарата с упругими панелями солнечной батареи динамическим регулятором / В.А. Ткаченко // Космические исследования. – Т. XXII, вып. 4. – 1984. – С. 520-530.
7. Ткаченко В.А. Синтез динамического регулятора при искусственной взаимосвязи движений космического аппарата с упругими панелями солнечной батареи / В.А. Ткаченко // Космические исследования. – Т. XXIII, вып. 3. – 1984. – С. 520-530.
8. Потапенко Е.М. Синтез и анализ робастной системы управления маневрирующего космического аппарата / Е.М. Потапенко, В.Г. Бичай // Космические исследования. – Т. 36, №. 4. – 1998. – С. 399-406.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ КВАДРАТИЧНОЙ ЗАДАЧИ О НАЗНАЧЕНИИ

Предложен приближенный полиномиальный по временной сложности алгоритм решения динамической квадратичной задачи о назначении. Для полученного решения значение целевой функции не хуже среднего.

Ключевые слова: квадратичная задачи о назначении, задача о назначении, перестановка, решение не хуже среднего.

Актуальность темы. Динамическая квадратичная задача о назначении (ДКЗН) является математической моделью ряда важных прикладных задач [1], [2]. В настоящее время не известны эффективные точные алгоритмы, позволяющие решать её в реальное время.

Анализ последних исследований. Динамическая квадратичная задача о назначении представляет собой обобщение известной НР-полной задачи – квадратичной задачи о назначении (КЗН), которая, как и задача о назначении (ЗН), является частным случаем ДКЗН.

В содержательной форме ДКЗН может быть описана следующим образом. Имеется система из n единиц оборудования (станков, бригад и т.п.), которая должна в фиксированный период времени выполнить комплекс из n работ: одна единица оборудования выполняет одну и только одну работу. Всего система функционирует T периодов времени. Размещение единиц оборудования по работам может изменяться только при переходе от одного периода обслуживания к другому, что требует соответствующей переналадки. При выполнении работ поток изготавливаемой продукции, сырьё и т.п. может перемещаться между пунктами расположения работ, перемещаемые объёмы также изменяются, вообще говоря, от периода к периоду. Эффективность работы системы зависит от суммарной эффективности назначений за всё время функционирования: затрат на назначения, затрат на перевозки и затрат на переналадку оборудования при переходе от одного периода обслуживания к другому. Необходимо для каждого пе-

риода обслуживания выбрать такие назначения, при которых общие затраты за всё время функционирования системы были минимальными.

Математическая модель содержательной постановки имеет вид задачи булева линейного программирования [1].

Пусть t – номер периода, $C_{ijkl} = f_{ikt} \cdot d_{jlt}$ – стоимость назначения оборудования i на j работу и оборудования k на l работу в период обслуживания t ,

f_{ikt} – объем потока от оборудования i к оборудованию k в период t , d_{jlt} – расстояние между пунктами расположения работ j и l в период t , R_{ijlt} – стоимость переналадки оборудования при переназначении оборудования i , обслуживающего в период t работу j , на работу l .

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{t=1}^T C_{ijkl} X_{ijt} X_{klt} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} R_{ijlt} X_{ijt} X_{jl(t+1)} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijt} = 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ijt} = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}$$

$$X_{ijt} \in \{0, 1\}$$

Задача (1) относится к труднорешаемым задачам дискретной оптимизации [1], [3], что делает маловероятным существование точных алгоритмов её решения в реальное время. В работе [1] для решения задачи (1) используется метод динамического программирования, декомпозиция и метаэвристики. Применяемый подход не позволяет количественно оценивать качество получаемого решения.

Целью работы является построение эффективного алгоритма приближенного решения ДКЗН с гарантированной оценкой качества, а именно, величина полученного решения должна быть не хуже среднего значения целевой функции.

Обоснование полученных результатов. Для удобства дальнейшего анализа введем ряд обозначений и опишем задачу (1) в комбинаторной форме.

Пусть $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $s = (i_1, i_2, \dots, i_n)$ – перестановка элементов множества N , $s^t = (i_1^t, i_2^t, \dots, i_n^t)$ – перестановка элементов множества N в период t , определяющая назначения единиц оборудования на работы в период t , $S = (s^1, s^2, \dots, s^T)$ – последовательность перестановок, определяющих назначения на все T периодов, а $\bar{S}$ – множество всех таких назначений.

Можно показать, что затраты на назначение в период t описываются функцией $q^t(s^t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ikt} d_{s(i)s(k)t}$, а затраты на переналадку при переходе от обслуживания в период t к обслуживанию в период $t+1$ – функцией $L^t(s^t, s^{t+1}) = \sum_{i=1}^n R_{is^t(i)s^{t+1}(i)t}$. Тогда общие затраты на обслуживание за все T периодов при назначении $S = (s^1, s^2, \dots, s^T)$ оцениваются величиной $\Phi(S) = \sum_{t=1}^T q^t(s^t) + \sum_{t=1}^{T-1} L^t(s^t, s^{t+1})$ и комбинаторная форма задачи (1) имеет вид

$$\Phi(S) = \sum_{t=1}^T q^t(s^t) + \sum_{t=1}^{T-1} L^t(s^t, s^{t+1}) \rightarrow \min_{S \in \bar{S}} \quad (2)$$

Отметим, что число элементов области минимизации равно $|\bar{S}| = (n!)^T$. Очевидно, что функция $q^t(s^t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ikt} d_{s(i)s(k)t}$ является целевой функцией квадратичной задачи о назначении, а функция $L^t(s^t, s^{t+1}) = \sum_{i=1}^n R_{is^t(i)s^{t+1}(i)t}$ при фиксированной перестановке s^t либо фиксированной перестановке s^{t+1} является целевой функцией задачи о назначении.

Определение. Пусть $\varphi = \varphi(x)$ – функция, определенная на множестве X . Решение $x^c \in X$ задачи:

$$\varphi(x) \rightarrow \min_{x \in X}$$

назовем **решением не хуже среднего**, если выполняется неравенство

$$\varphi(x^c) \leq \frac{\sum_{x \in X} \varphi(x)}{|X|} \quad (3)$$

Пусть $\bar{S}_{i_1, i_2, \dots, i_k} \subseteq \bar{S}$ состоит из тех и только тех последовательностей перестановок $S = (s^1, s^2, \dots, s^T)$, в которых на первых k местах стоят фиксированные перестановки, а именно – $s^1 = s^{i_1}, s^2 = s^{i_2}, \dots, s^k = s^{i_k}$; $M(\bar{S}_{i_1, i_2, \dots, i_k}) = \sum_{S \in \bar{S}_{i_1, i_2, \dots, i_k}} \Phi(S)$, тогда $M(\bar{S}) = \sum_{S \in \bar{S}} \Phi(S)$. Кроме того, будем полагать, что $F_1(s^1) = q^1(s^1) + (1/(n!)) \cdot \sum_{s^2} L^1(s^1, s^2)$, $F_k(s^{c_{k-1}}, s^k) = q^k(s^k) + L^{k-1}(s^{c_{k-1}}, s^k) + (1/(n!)) \cdot \sum_{s^{k+1}} L^k(s^k, s^{k+1})$, здесь $1 < k \leq T-1$, $F_T(s^{c_{T-1}}, s^T) = q^T(s^T) + L^{T-1}(s^{c_{T-1}}, s^T)$.

Теорема. Если перестановки $s^{c_1}, s^{c_2}, \dots, s^{c_T}$ – решения не хуже среднего соответственно задач:

$$F_1(s^1) \rightarrow \min_{s^1} \quad (4)$$

$$F_k(s^{c_{k-1}}, s^k) \rightarrow \min_{s^k}, \text{ где } 1 < k \leq T, \quad (5)$$

то последовательность перестановок $S^c = (s^{c_1}, s^{c_2}, \dots, s^{c_T})$ является решением не хуже среднего для задачи (2).

Доказательство. Из определения решения не хуже среднего (2) следует, что для перестановок $s^{c_1}, s^{c_2}, \dots, s^{c_T}$ выполняются неравенства

$$\sum_{s^1} F_1(s^1) = \sum_{s^1} q^1(s^1) + (1/(n!)) \cdot \sum_{s^1} \sum_{s^2} L^1(s^1, s^2) \geq n! F_1(s^{c_1}), \quad (6)$$

$$\sum_{s^k} F_k(s^{c_{k-1}}, s^k) = \sum_{s^k} q^k(s^k) + \sum_{s^k} L^{k-1}(s^{c_{k-1}}, s^k) + (1/(n!)) \cdot \sum_{s^k} \sum_{s^{k+1}} L^k(s^k, s^{k+1}) \geq n! F_k(s^{c_{k-1}}, s^{c_k}), \text{ где } 1 < k \leq T-1, \quad (7)$$

$$\sum_{s^T} F_T(s^{c_{T-1}}, s^T) = \sum_{s^T} q^T(s^T) + \sum_{s^T} L^{T-1}(s^{c_{T-1}}, s^T) \geq n! F_T(s^{c_{T-1}}, s^{c_T}) \quad (8)$$

Можно проверить, что

$$M(\bar{S}) = \sum_{t=1}^T (n!)^{T-1} \sum_{s^t} q^t(s^t) + \sum_{t=1}^{T-1} (n!)^{T-2} \sum_{s^t} \sum_{s^{t+1}} L^t(s^t, s^{t+1}) \quad (9)$$

Используя неравенства (6), (7), (8), последовательно преобразуем (9) следующим образом. Применяя неравенство (6) и неравенство (7) для $k=2$, получаем соотношения:

$$\frac{M(\bar{S})}{(n!)^{T-1}} = (\sum_{s^1} q^1(s^1) + (1/(n!)) \cdot \sum_{s^1} \sum_{s^2} L^1(s^1, s^2)) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\sum_{t=2}^T \sum_{s^t} q^t(s^t) + (1/(n!)) \cdot \sum_{t=2}^{T-1} \sum_{s^t} \sum_{s^{t+1}} L^t(s^t, s^{t+1}) \right) \geq n! F_1(s^{c_1}) + \\
 & + \left(\sum_{t=2}^T \sum_{s^t} q^t(s^t) + (1/(n!)) \cdot \sum_{t=2}^{T-1} \sum_{s^t} \sum_{s^{t+1}} L^t(s^t, s^{t+1}) \right) = \\
 & \quad n! \cdot q^1(s^{c_1}) + \sum_{s^2} L^1(s^{c_1}, s^2) + \left(\sum_{s^2} q^2(s^2) + (1/(n!)) \cdot \sum_{s^2} \sum_{s^3} L^2(s^2, s^3) \right) + \\
 & + \left(\sum_{t=3}^T \sum_{s^t} q^t(s^t) + (1/(n!)) \cdot \sum_{t=3}^{T-1} \sum_{s^t} \sum_{s^{t+1}} L^t(s^t, s^{t+1}) \right) = \\
 & \quad n! \cdot q^1(s^{c_1}) + \left(\sum_{s^2} q^2(s^2) + \sum_{s^2} L^1(s^{c_1}, s^2) + (1/(n!)) \cdot \sum_{s^2} \sum_{s^3} L^2(s^2, s^3) \right) + \\
 & + \left(\sum_{t=3}^T \sum_{s^t} q^t(s^t) + (1/(n!)) \cdot \sum_{t=3}^{T-1} \sum_{s^t} \sum_{s^{t+1}} L^t(s^t, s^{t+1}) \right) = n! \cdot q^1(s^{c_1}) + \sum_{s^2} F_2(s^{c_1}, s^2) + \\
 & + \left(\sum_{t=3}^T \sum_{s^t} q^t(s^t) + (1/(n!)) \cdot \sum_{t=3}^{T-1} \sum_{s^t} \sum_{s^{t+1}} L^t(s^t, s^{t+1}) \right) \geq n! \cdot q^1(s^{c_1}) + n! \cdot F_2(s^{c_1}, s^{c_2}) + \\
 & + \left(\sum_{t=3}^T \sum_{s^t} q^t(s^t) + (1/(n!)) \cdot \sum_{t=3}^{T-1} \sum_{s^t} \sum_{s^{t+1}} L^t(s^t, s^{t+1}) \right) = \\
 & \quad n! \cdot q^1(s^{c_1}) + n! \cdot q^2(s^2) + n! \cdot L^1(s^{c_1}, s^{c_2}) + \sum_{s^3} L^2(s^{c_2}, s^3) + \\
 & + \left(\sum_{t=3}^T \sum_{s^t} q^t(s^t) + (1/(n!)) \cdot \sum_{t=3}^{T-1} \sum_{s^t} \sum_{s^{t+1}} L^t(s^t, s^{t+1}) \right), \text{ т.е.} \\
 & \quad \frac{M(\bar{S})}{(n!)^{T-1}} \geq n! \cdot q^1(s^{c_1}) + n! \cdot q^2(s^{c_2}) + n! \cdot L^1(s^{c_1}, s^{c_2}) + \sum_{s^3} L^2(s^{c_2}, s^3) + \\
 & + \left(\sum_{t=3}^T \sum_{s^t} q^t(s^t) + (1/(n!)) \cdot \sum_{t=3}^{T-1} \sum_{s^t} \sum_{s^{t+1}} L^t(s^t, s^{t+1}) \right).
 \end{aligned}$$

Действуя аналогичным образом, последовательно используя (7) для $k=3,4,\dots,T-1$, получаем –

$$\frac{M(\bar{S})}{(n!)^{T-1}} \geq n! \cdot \sum_{i=1}^{T-1} q^i(s^{c_i}) + n! \cdot \sum_{i=1}^{T-2} L^i(s^{c_i}, s^{c_{i+1}}) + \left(\sum_{s^T} L^{T-1}(s^{c_{T-1}}, s^T) + \sum_{s^T} q^T(s^T) \right).$$

Отсюда и из (8) следует, что $\frac{M(\bar{S})}{(n!)^T} \geq \Phi(S^c) = \sum_{t=1}^T q^t(s^{c_t}) + \sum_{t=1}^{T-1} L^t(s^{c_t}, s^{c_{t+1}})$,

т.е. S^c – решение не хуже среднего для задачи (2), что и завершает доказательство.

Не сложно показать, что

$$\sum_{s^{k+1}} L^k(s^k, s^{k+1}) = \sum_{s^{k+1}} \sum_{i=1}^n R_{is^k(i)s^{k+1}(i)t} = (n-1)! \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{is^k(i)jk}, \quad (10)$$

следовательно, $\sum_{s^{k+1}} L^k(s^k, s^{k+1})$ – целевая функция задачи о назначении.

Из (10) также следует, что

$$F_1(s^1) = q^1(s^1) + (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{is^1(i)j1}, \quad (11)$$

$$F_k(s^{k-1}, s^k) = q^k(s^k) + L^{k-1}(s^{k-1}, s^k) + (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{is^k(i)jk} \quad (12)$$

для $1 < k \leq T-1$, т.е. функции $F_1(s^1)$ и $F_k(s^{k-1}, s^k)$ для $1 < k \leq T$, если перестановка s^{k-1} фиксирована, это целевые функции квадратичной задачи о назначении. Кроме того, из (11), (12) следует, что матрицы задач назначения и квадратичных задач назначения, определяющих вид целевых функций задач (4), (5), вычисляются за время порядка n^2 .

Для поиска решений $s^{c_1}, s^{c_2}, \dots, s^{c_T}$ не хуже среднего задач (4), (5) можно использовать алгоритм из работы [4].

Оценим временную сложность построения решения $S^c = (s^{c_1}, s^{c_2}, \dots, s^{c_T})$. Вид целевых функций задач (4), (5) вычисляются за время порядка n^2 , временная сложность нахождения решения s^{c_1} для квадратичной задачи назначения и задачи о назначения порядка n^5 [4], поэтому построение решения $S^c = (s^{c_1}, s^{c_2}, \dots, s^{c_T})$ имеет временную сложность порядка $T \cdot n^5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sirirat Muenvanichakul, Peerayuth Charnsethikul. The approximated dynamic programming approach to the dynamic quadratic assignment problem// Thammasat Int. J. Sc. Tech., 2007. Vol. 12, No.2 April-June. –P. 20-27.
2. Lacksonen. T. A., Ensore, E. E., Quadratic Assignment Algorithms for the Dynamic Layout Problem // International Journal of Production Research, 1993. Vol.31, No.3. – P. 503-517.
3. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. / Гери М., Джонсон Д. М.: Мир, 1982. 416 с.
4. Ходзинский А. Н. Последовательный алгоритм решения задач комбинаторной оптимизации // Кибернетика, 1985. №6. – С. 56-60.

Т.А. Манько, А.В. Рыбалко

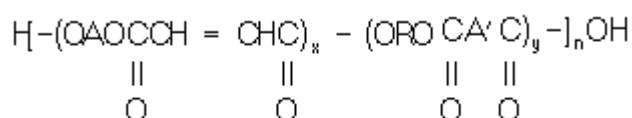
ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Анотация. На основании экспериментальных исследований с помощью ИК нагрева были получены образцы из ПКМ на основании полиэфирного связующего, которые обладают высокой механической прочностью и компактной структурой в сравнении с композицией, которая отверждена традиционным методом. Данный вывод подтверждается структурным и механическим анализом.

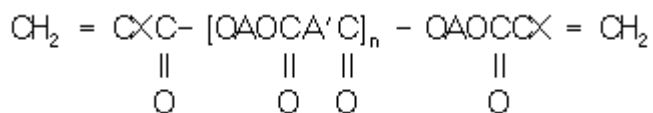
Ключевые слова: полиэфирные связующие, полимер, ИК-облучение, отверждение композиции, структурный анализ, механический анализ, подтверждение.

Постановка задачи. В настоящее время наиболее широко используются в ветроэнергетике стеклопластики на основе полиэфирных смол. Физико – механические свойства и химическая стойкость их несколько ниже, чем скажем у эпоксидных полимеров, но применительно к ветроэнергетике эти факторы допустимы. Полимеры потверждаются при повышенных температурах, для чего требуется специальное оборудование (автоклав). Композиции на основе полиэфирных связующих отличаются сравнительной дешевизной, быстро отверждаются при комнатной температуре, просты в изготовлении и легки в обращении.

Полиэфирные смолы - это ненасыщенные олигомеры (олигоэфиры) поликонденсационного типа, например полималеинаты и олигоэфиракрилаты. Олигоэфиры получают поликонденсацией в расплаве или инертном растворителе полималеинаты



из малеиновой кислоты $\text{HOOCCH}=\text{CHCOOH}$ или её ангидрида (иногда в смеси с дикарбоновой кислотой или ангидридом) и гликоля - олигоэфиракрилаты



из ненасыщенной монокарбоновой кислоты [обычно акриловой $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ или метакриловой $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOH}$], гликоля и дикарбоновой кислоты. В приведенных выше формулах А и А' — двухвалентные остатки, входящие в состав молекул гликоля и дикарбоновой кислоты соответственно; $\text{X}=\text{—H}$, —CH_3 или —Cl ; $x = 1\text{--}5$; $y = 0\text{--}5$; $n = 1\text{--}20$.

Полиэфирные смолы относятся к веществам, для которых воздух является ингибитором. Это означает, что поверхность смолы, контактирующая с воздухом, не отверждается (по крайней мере полностью). Даже когда смола перейдет в твердое состояние, ее полное отверждение не достигается. Для окончательного отверждения ее поверхность необходимо изолировать от воздуха, что возможно вводя в композицию раствор парафина в стироле.

На всем протяжении процесса пропитки стекломатериалов, за исключением наружных слоёв, должна использоваться конструкционная смола (воздух препятствует отверждению, не содержат воска). Причина этого заключается в том, что стеклопластик представляет собой композицию состоящую из набора слоев стекловолокна, каждый из которых пропитан смолой и находится в контакте с соседним. Поверхности слоев ламината, пропитанных конструкционной смолой, сохраняют липкость в процессе набора толщины и обеспечивают прочную связь с последующими слоями. Эти связи называют промежуточными. Если бы для целей ламинирования использовалась отделочная смола (воздух не препятствует отверждению, содержат воск), для обеспечения адгезии слоев всплывающий к поверхности воск необходимо было удалять перед каждым последующим слоем шлифованием. При ламинировании будет затруднительно, если каждый новый слой необходимо будет подвергать такой обработке перед укладкой последующего. Поэтому необходимо использовать конструкционную смолу, чтобы процесс ламинирования можно было вести непрерывно. При этом будет обеспечена надежная промежуточная связь слоев, которая в случае применения отделочной смолы всегда была бы под вопросом. К воцеленной поверхности смола просто не клеится.

Существует три типа полиэфирных смол "ортофталевая", "изофталевая", "винилэфирная" и "модифицированная DCPD". Ос-

новные различия, по крайней мере с точки зрения химии, заключаются в том, что при однотипности техпроцесса они различаются молекулярной массой и строением. Причины этих различий заключаются в характеристиках готового стеклопластика и условиях его эксплуатации.

С точки зрения молекулярного строения изофталевые смолы устроены более сложно чем ортофталевые, а винилэфирные сложнее тех и других. Однако все три - это полиэфирные смолы. Известно, что самый распространенный тип смол - это изофталевые. Изофталевая смола обладает улучшенными физико-механическими свойствами и обеспечивает стеклопластику более высокие характеристики, у неё высокая коррозионная стойкость и стойкость к растворителям (по сравнению с ортофталевой), она более прочная и лучше держит удары. У изофталевой смолы также лучше адгезионные свойства.

Для приготовления смолы технологический процесс предусматривает разбавление её стиролом, который составляет значительную часть полиэфирной смолы – 20...40 %. После разбавления смолы стиролом она готова к эксплуатации, необходимо только ввести добавки, т.е. различные наполнители, активаторы и прочие модификаторы, что приводит к появлению множества самых разных полиэфирных смол.

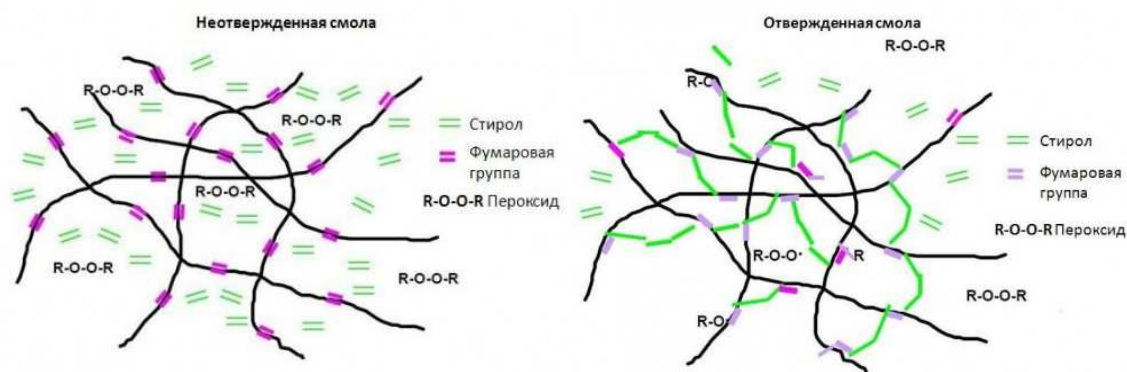
Чтобы представленный процесс приготовления полиэфирной смолы был реализован и в результате мы получили бы отвержденную массу, требуются еще два дополнительных фактора. Первый называется акселератор (или активатор, что одно и то же) или катализатор (иногда его называют "отвердителем"). Вторым фактором – постотверждение полученной композиции.

Технологический процесс отверждения:

- Отверждение – сшивание полиэфирных молекул стиролом
- Реакция начинается с наличием радикалов



Выше сказанные компоненты находятся в паре и способствуют ускоренному отверждению смолы. Фактически катализатор выступает тем источником внутреннего теплообразования, за счет которого и происходит отверждение, а акселератор делает этот процесс возможным при естественной температуре без применения внешних источников тепла. В результате процесса синтеза не образуется никаких побочных продуктов. Именно соотношение этих двух ингредиентов определяет ход отверждения (чаще говорят про время желатинизации) и время, необходимое для превращения смолы в твердое состояние.



Рисунок

Катализаторы и акселераторы являются веществами, которые работают только в определенных комбинациях, и несколько таких комбинаций применяются с полиэфирными смолами, являются пероксиды (перекиси), а именно перекись метилэтилкетона (ПМЭК) и перекись дибензоила (БПО), а также смеси перекисей:

1. Перекись метилэтилкетона (ПМЭК):

- Butanox M-50 средняя реактивность, (АО - 8,9%);
- Butanox M-60 средняя реактивность, (АО - 9,9%);
- Butanox HVO-50 высокая реактивность, (АО - 9,9%);
- Butanox LA низкая реактивность, (АО - 8,7%);
- Butanox LPT очень низкая реактивность, (АО - 8,5%).

2. Перекись метилэтилкетона (ААП):

- Trigonoх 44В быстрое отверждение, (АО - 4,1%).

3. Перекись дибензоила (БПО):

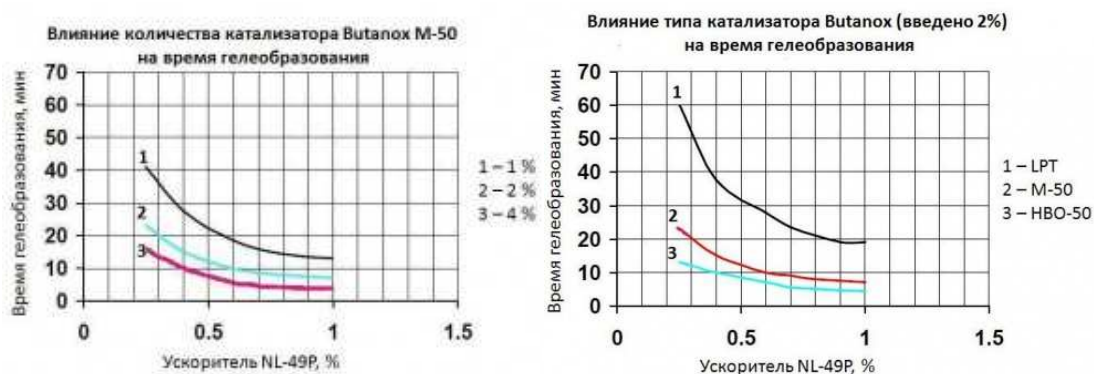
- Perkadox CH-50X сыпучий, общего назначения, (АО - 3,3%);
- Perkadox CH-50L сыпучий, для прозрачных пластиков, (АО -

3,3%);

- Perkadox 40E жидкий, (АО - 2,6%);
- Perkadox BT-50 паста, (АО - 3,3%).

4. Смеси перекисей:

- Trigonoх 61 быстрое отверждение, смесь ПМЭК/ААП, (АО - 7,8%);
- Trigonoх 63 быстрое отверждение, смесь ПМЭК/ААП, (АО - 6,6%);
- Trigonoх 51 низкий экзотермический пик, смесь ААП, (АО - 5,8%);
- Trigonoх 82 низко реактивный ПМЭК с низким экзотермическим пиком (АО - 8,5%).



Рисунок

Для большинства изделий в ветроэнергетике стандартным катализатором для полиэфирной смолы CRISTIC 701 PA (изофталевая полиэфирная смола низкой вязкости) и контролируемыми экзотермическими свойствами обычно является пероксид BUTANOX M50.

Тепло, производимое этим веществом, когда он смешивается в смоле, является результатом быстрого окисления, его скорость зависит от количества и пропорций этого компонента, окружающей температуры на рабочем месте.

Отверждение смолы в значительной степени зависит от температуры, в среднем оно занимает 1-3 часа. Следует заметить, что время синтеза вовсе не означает полного отверждения смолы, этот процесс занимает более значительное время - возможно, несколько дней. В течение всего этого периода стеклопластиковая конструкция сохраняет некоторую степень гибкости и если проектная форма конечного изделия имеет значение, необходимо принять соответствующие меры для избежания деформации до приобретения им необходимой жесткости. Либо обеспечить эту жесткость установкой соответствующих

конструктивных элементов до извлечения из матрицы или снятия с оправки. Стеклопластиковое изделие будет и далее отверждаться и набирать прочность достаточно длительное время после своего изготовления. Указать точные сроки этого процесса невозможно, однако неделя и более представляется обычным делом.

Поскольку процесс постотверждения конструкций из стеклопластика при конвективном нагреве является длительным и не всегда представляется возможным гарантировать стабильность физико-механических характеристик материала, с целью его интенсификации и получения качественных изделий, постотверждение производят облучением, таким как ультрафиолетовое, радиационное, в частности инфракрасное (ИК).

Известно, что для композитов на связующих поликонденсационного типа при конвективном нагреве затруднено удаление летучих компонентов. Все эти недостатки приводят к нарушению адгезионной прочности на границе наполнитель - матрица.[1]

Применение установок ИК облучения позволяет решить проблему удаления летучих, что приводит к повышению физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов при существенной интенсификации технологического процесса. Установлено, что при ИК излучении между излучателями и полимером происходит резонансное взаимодействие, благодаря чему процессы нагрева и постотверждения совмещаются, а следовательно и резко сокращается время формообразования изделий.

На основании вышеизложенного можно сказать, что ИК нагрев интенсифицирует процесс постотверждения благодаря воздействию квантов энергии $h\nu$ на развитие химических реакций между макромолекулами, то есть способствует возникновению фотохимических процессов взаимодействия между ними.

С целью эффективного использования ИК излучения в работе создана нагревательная установка. При расчёте нагревательной установки на передний план было выдвинуто: выбор типа источников ИК излучения, определение мощности генераторов ИК излучения, их качества, размеров и рационального расположения в установке. Основными требованиями при определении энергетических характеристик установок является обеспечение равномерности облучения поверхности материала в процессе нагрева до заданной температуры. Расчёт

ИК установок проводили на основе дифференциального уравнения теплового баланса, в котором энергия поглощаемая облучаемым материалом за время dx затрачивается на нагрев (dQ_H), отдачу тепла конвекцией (dQ_K), излучение ($dQ_{изл}$) и на испарение растворителей ($dQ_{исп}$) [2]:

$$dQ = dQ_H + dQ_K + dQ_{изл} + dQ_{исп}$$

При проектировании установок ИК нагрева одной из главных задач является определение оптимального типа излучателей. С целью выбора наиболее эффективного нагревателя, для передачи максимальной удельной мощности к поверхностному слою исследованных композиций, были подобраны ИК излучатели, которые имеют одинаковые или похожие спектральные свойства с данными композициями. Такими излучателями в данной работе являются галогенные лампы накаливания (ГЛН) типа КГТ-220-1000-1. Их применение позволило значительно ускорить процесс синтеза полимеров, за счёт того что оптические свойства полимера и спектральные характеристики излучателя совпадают в диапазоне длин волн $(2,7 - 4) \cdot 10^{-6}$ м.

Расположение ГЛН оптимизировали в результате анализа энергетических характеристик и полей облученности, создаваемых как одиночными лампами, так и их группой.

Расчёт плотности облучения ГЛН, проведенный при допущении о равномерном распределении температуры по толщине материала, показал, что одиночная лампа создаёт неравномерное поле излучения как по длине, так и в направлении, перпендикулярном оси. Достижение близкой к равномерной облученности на значительной площади обеспечивается соединением нескольких ламп в группу.

При совместном действии группы излучателей в результате суммирования кривых распределения энергии одиночных ГЛН, создаётся равномерное поле облучения, при этом облученность увеличивается в несколько раз. Изменение значений величины облученности достигается также регулировкой питающего напряжения.

Применение отражателей обеспечивает создание необходимой степени равномерности поля облучения и увеличение значений облученности материала.

В результате анализа всех факторов, были выбраны основные параметры установки для проведения экспериментальных работ по

отверждению образцов полиэфирной композиции инфракрасными источниками нагрева. Данная установка представлена на рис. 1.

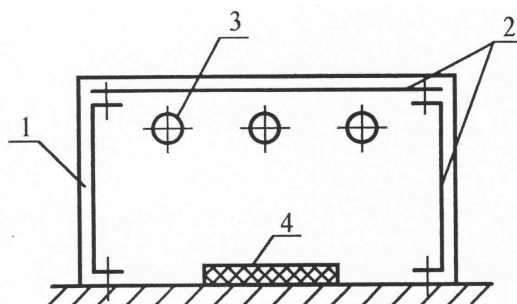


Рисунок 1 - Схема установки для ИК нагрева

1 – корпус; 2 – отражатели; 3 – ГЛН; 4 – образец

Установка состоит из корпуса 1, к верхней и боковым поверхностям которого прикреплены отражатели 2. Под верхним отражателем крепятся три галогенные лампы накаливания 3, типа КГТ-220-1000-1. Нагреваемый образец 4 устанавливается в нижней части корпуса. В качестве материала отражателя был выбран медный лист, поверхность которого отполирована до шероховатости $Rz=20$. Известно, что отражательная способность поверхности зависит от материала и его шероховатости. В ИК области с увеличением электропроводности металлов их отражательная способность увеличивается.

Инфракрасный нагрев неразрывно связан с конвективным, так как всякий источник определенную часть тепла передает с помощью инфракрасных лучей, который называется радиационной теплопередачей (РТ), а часть - путем конвекции (рис. 2).

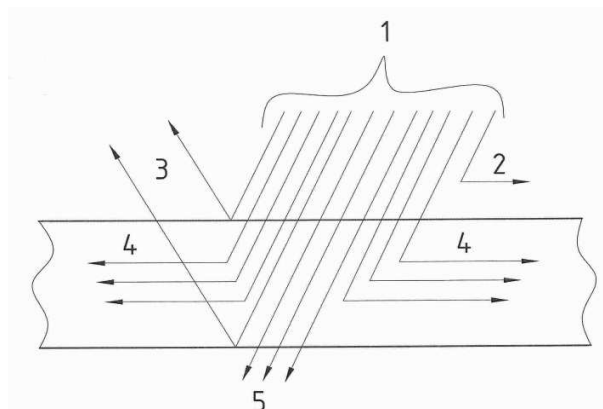


Рисунок 2 - Схема действия лучей

1 - излучаемый поток; 2 - энергия поглощения средой (конвекция);
3 - отраженный поток (конвекция); 4 - поглощенная энергия;
5 - поток излучения, прошедший сквозь тело

Такой механизм теплопередачи при инфракрасном облучении в корне отличается от механизма конвективного теплопереноса, в котором нагрев материала направлен снаружи внутрь, т. е. температурный градиент направлен навстречу градиенту влажности и движению частицы растворителя и пластификатора, замедляя их испарение [2].

Проанализировав выше сказанное, в работе были проведены эксперименты по постотверждению образцов, а по результатам экспериментов - исследованы их физико-механические характеристики. Целью экспериментов было достижение стабильных и высоких показателей механических характеристик, при значительной интенсификации процесса.

Результаты эксперимента и их обсуждение. В качестве объекта исследования использовали следующие материалы: связующее - полиэфирная смола CRISTIC 701 PA и композит из стеклоткани пропитанный полиэфирной смолой.

Данный эксперимент проводили следующим образом.

Были приготовлены два вида образцов:

а – размером 10x10x10 мм состоящий из полиэфирной смолы CRISTIK 701 PA и 1,5% Butanox M50 (15 образцов);

б – размером 4x10x25 мм состоящий из стеклоткани S14EU910-00950-01300-499000 и S32EX010-00811-01270-264000 пропитанной полиэфирной смолой CRISTIK 701 PA и 1,5% Butanox M50 (15 образцов).

Подготовленные образцы помещали в установку для традиционного конвективного и разработанного ИК нагрева. Проводили процесс постотверждения по следующим режимам:

1. Процесс постотверждения в печи конвективного нагрева 5-и образцов вида «а» и 5-и образцов вида «б»:

- подъём до $t^{\circ}=40^{\circ}\text{C}$ в течении 8 часов;
- выдержка при $t^{\circ}=40^{\circ}\text{C}$ – 24 часов;

Общее время составило – 32 часа или 1920 минут.

2. Процесс постотверждения в установке ИК нагрева 5-и образцов вида «а» и 5-и образцов вида «б»:

- подъём до $t^{\circ}=60^{\circ}\text{C}$ в течении 15 мин.;
- выдержка при $t^{\circ}=60^{\circ}\text{C}$ - 30 мин.;
- подъём до $t^{\circ}=80^{\circ}\text{C}$ в течении 15 мин.;
- выдержка при $t^{\circ}=80^{\circ}\text{C}$ - 30 мин.;

Общее время составило – 90 минут.

3. Процесс постотверждения в установке ИК нагрева 5-и образцов вида «а» и 5-и образцов вида «б»:

- подъём до $t^0=45^{\circ}\text{C}$ в течении 10 мин.;
- выдержка при $t^0=45^{\circ}\text{C}$ - 30 мин.;
- подъём до $t^0=55^{\circ}\text{C}$ в течении 10 мин.;
- выдержка при $t^0=55^{\circ}\text{C}$ - 30 мин.;

Общее время составило – 80 минут.

Образцы постотвержденные по различным режимам подвергались механическим испытаниям. Проводили 10 измерений микротвёрдости для каждого образца на установке ПМТ-3 при нагрузке 10 г и выдержке в течении 15 сек и определяли два параметра:

1. Микротвёрдость по Виккерсу:

$$H_{\mu} = \frac{1854 \cdot 10}{(\Delta \cdot 0,307)^2} \left(\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \right), \text{ где } \Delta - \text{разница длины диагоналей пирамиды.}$$

2. Погрешность измерений:

$$S = \sqrt{D}, \text{ где } D - \text{дисперсия.}$$

Результаты измерений показали, что для образцов отвержденных конвективным нагревом микротвёрдость составляет – образец «а» 31,61 кгс/мм² и образец «б» 25,73 кгс/мм², для образцов отвержденных при ИК нагреве по 1-ому режиму – образец «а» 31,18 кгс/мм² и образец «б» 25,17 кгс/мм², по 2-ому режиму – образец «а» 34,11 кгс/мм² и образец «б» 27,69 кгс/мм². Полученные результаты представлены на рис. 3.

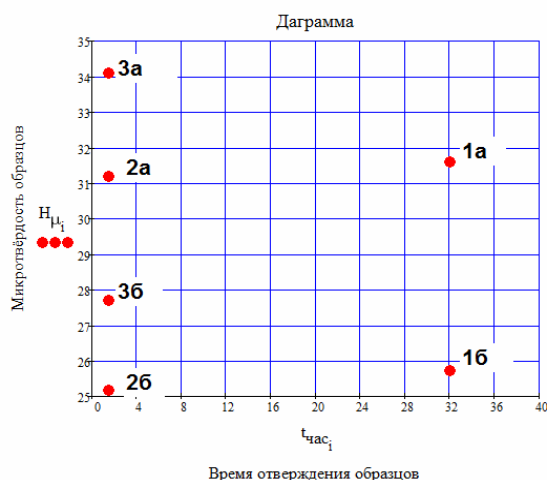


Рисунок 3 - Зависимость микротвёрдости образцов от времени и типа постотверждения: 1. Конвективный нагрев; 2. Инфракрасный нагрев по 1-ому режиму; 3. Инфракрасный нагрев по 2-ому режиму

Из графика видно, что образец постотвержденный ИК нагревом за 80 минут имеет более высокую микротвёрдость. Это говорит о высокой степени постотверждения и получения компактной структуры полимера.

Полученные выводы подтверждаются результатами металлографических исследований, выполненных на микроскопе МИМ – 8 при увеличении 150 крат (рис. 4).

Установлено, что при постотверждении композита с помощью ИК нагрева (рис. 4а), наблюдается компактная микроструктура материала, что может быть связано с качественным удалением летучих в процессе поликонденсации и равномерного нагрева поверхности образца.

При конвективном же нагреве микроструктура иная, в ней наблюдается определённое количество пор. Это можно объяснить несовершенным удалением летучих компонентов.

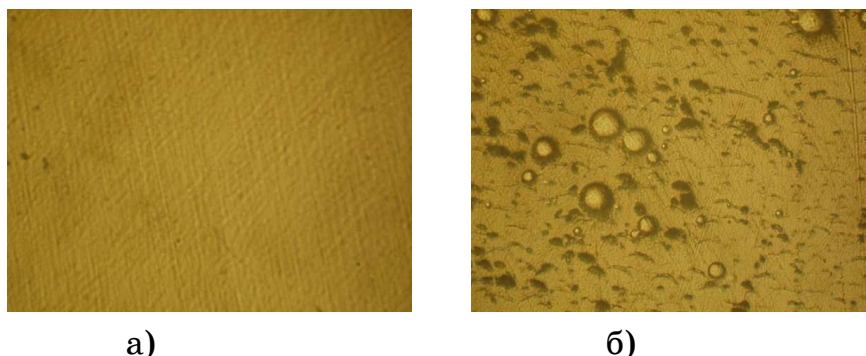


Рисунок 4 - Микроструктура образца: а) при инфракрасном нагреве; б) при конвективном нагреве

Выводы. На основании проведенных исследований установлено, что ИК нагрев является экономно-сберегающим технологическим приёмом при получении изделий из композиционных материалов. При отверждении композиционных материалов с помощью ГЛН увеличивается механическая прочность материала до 12 % в сравнении с традиционным конвективным нагревом при значительной интенсификации процесса (1920 минут и 80 минут соответственно). Это же подтверждается получением компактной структуры образцов.

Данные исследования показали, что для сокращения процесса постотверждения стеклопластика на основе полиэфирной смолы, рекомендуется применить ИК нагрев, который гарантирует равномерность распределения температуры по всей обрабатываемой поверхно-

сти, сохранении стабильных повышенных физико – механических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манько Т.А. Прикладное материаловедение и технология конструкционных материалов. – Днепропетровск: ДНУ, 2005. – 150 с.
2. Полімерні композиційні матеріали в ракетно – космічній техніці: Підручник/ Є.О.Джур, Л.Д.Кучма, Т.А.Манько та ін. – К.:Вища освіта, 2003. – 399 с.
3. Практикум по полимерному материаловедению/ Под ред. П.Г.Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 256 с.
4. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982.
5. Розен Б. Механика упрочнения композиций. Волокнистые композиционные материалы. – М.: Мир, 1967. – с.54.
6. Карпинос Д.М. Новые композиционные материалы: Уч. пос. – К.: Вища школа, 1977. – 312 с.

Є.А. Гавриленко, В.В. Гнатушенко, В.М. Щербина
**ВИЗНАЧЕННЯ ДІАПАЗОНІВ ПОЛОЖЕННЯ НОРМАЛЕЙ
У ВУЗЛАХ ДПК З МОНОТОННОЮ ЗМІНОЮ КРИВИНИ**

Анотація. Визначається область можливого розташування нормалей, які відповідають вихідним вузлам дискретно представленої кривої з монотонною зміною кривини.

Ключові слова: дискретно представлена крива (ДПК), монотонна зміна кривини, нормаль, стичне коло, радіус кривини.

Постановка проблеми. При формуванні обводів з монотонною зміною кривини, в точках вихідного ряду призначаються нормалі і значення радіуса кривини, які відповідають формі ДПК. Положення нормалей і значення радіуса кривини визначаються усередині відповідних діапазонів. Уточнення зазначених діапазонів і визначення, таким чином, області оптимального розв'язку поставленої задачі неможливо без визначення обмежень, які виникають в зв'язку з призначенням сусідніх центрів кривини.

Аналіз останніх досліджень. Результати попередніх досліджень по темі запропонованої статті опубліковані в [1,2]. У роботі [1], визначається область можливого розташування центру кривини, що відповідає i -му вузлу вихідної ДПК з монотонною зміною кривини. Зазначена область являє собою трикутник (трикутник центру кривини – ТЦК) обмежений прямими лініями: перпендикуляр до хорди супровідної ламаної лінії $[i-1;i]$, що проходить через її середину ($li-1$); перпендикуляр до хорди $[i;i+1]$, що проходить через її середину (li); відрізок, що єднає вузол i та центр i -го прилягаючого кола (ПК i) – кола, яке визначається точками $i;i+1;i+2$. ТЦК визначається без врахування обмежень, які пов'язані з призначенням центрів кривини на сусідніх ділянках ДПК.

В роботі [2] визначені обмеження, що накладаються на область можливого положення|становища| центру кривини|кривини| вузла| ви-

хідної|початковою| ДПК з|із| монотонною зміною кривини|кривини|, положенням|становищем| сусідніх центрів кривини|кривини|, призначення конкретного положення нормалі n_i визначає крайні, повернені за годинниковою стрілкою, положення нормалей n_{i-1} і n_{i+1} при яких задача формування обводу з монотонною зміною кривини має розв'язок. Призначення положення центру кривини C_i визначає крайні, повернені проти годинникової стрілки, положення нормалей n_{i-1} і n_{i+1} .

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є розробка способу визначення області можливого розташування нормалей, які відповідають вузлам вихідної ДПК з монотонною зміною кривини, та враховує область можливого положення сусідніх нормалей.

Основна частина. Вихідний|початковий| ТЦК визначається вершинами [1] (див. рис. 1):

- T_i – точка перетину прямої l_{i-1} і нормалі n_i в положенні, коли вона максимально повернена за годинниковою стрілкою ($'n_i$);
- C_i – центр ПК $_i$;

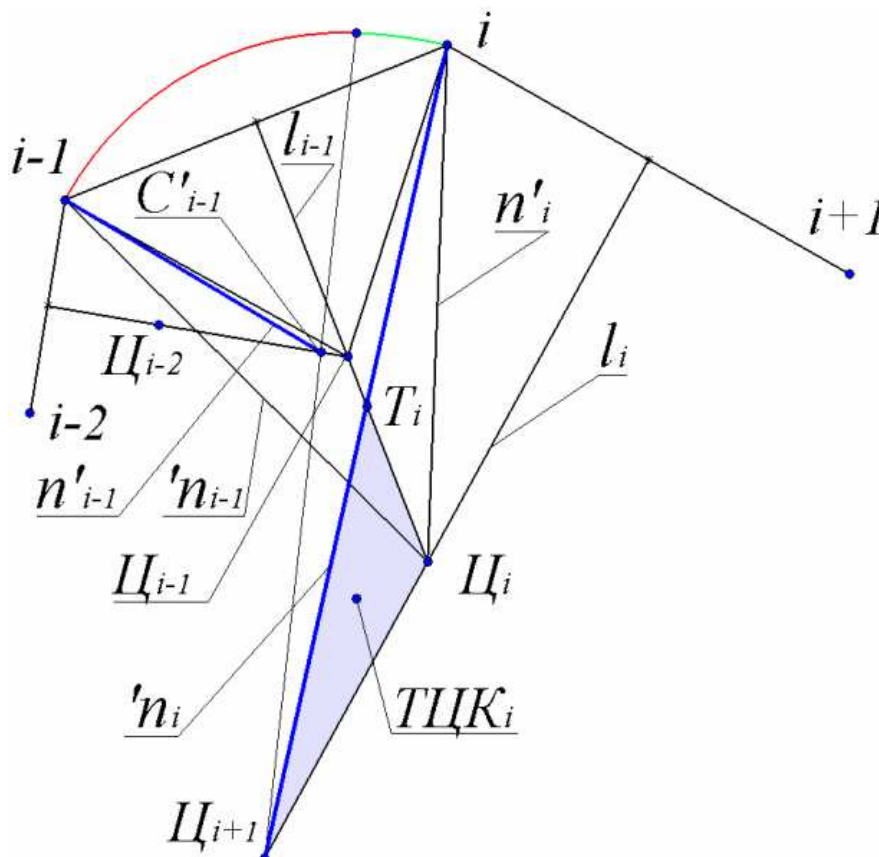


Рисунок 1

- Π_{i+1} – центр ΠK_{i+1} (рис. 1). Можливий варіант, коли третьою вершиною $T\Omega K_i$ є точка K_i (рис. 2). Це станеться у тому випадку, коли пряма сполучає вузол i з центром ΠO_{i-1} менш повернена за годинниковою стрілкою порівняно з прямою такою, що сполучає вузол i з центром ΠO_{i+1} .

Сторони $T\Omega K_i$ визначаються прямими l_{i-1} , l_i і нормаллю n_i в положенні $\angle n_i$. Сторона $[i; \Pi_i]$ визначає крайнє, повернення проти годинникової стрілки положення нормалі $n_{i-1} - n/i$. Аналогічно, для $T\Omega K_{i-1}$ прямі $(i-1; \Pi_i)$ і $(i-1; \Pi_{i-1})$ є вихідними положеннями $\angle n_{i-1}$ та $n/i-1$, відповідно. Вершина $T\Omega K_{i-1}$ – точка Π_{i-1} може збігатися з вершиною $T\Omega K_i$ – точкою T_i або розташовуватися за його межами.

У першому випадку пряма $(i; T_i)$ є положенням $\angle n_i$ i -ї нормалі (рис. 2). При збігу точок Π_{i-1} і T_i уточнення вихідних положень $n/i-1$ і $\angle n_i$ не потрібне. Якщо при такому розташуванні $T\Omega K$ для нормалі n_i призначити положення $\angle n_i$, то єдине можливе положення нормалі $n_{i-1} - n/i-1$ і навпаки. В цьому випадку ділянка ДПК $(i-2 \dots i)$ буде сформована дугою кола з центром в точці $C_{i-1} \equiv C_i \equiv \Pi_{i-1} \equiv T_i$.

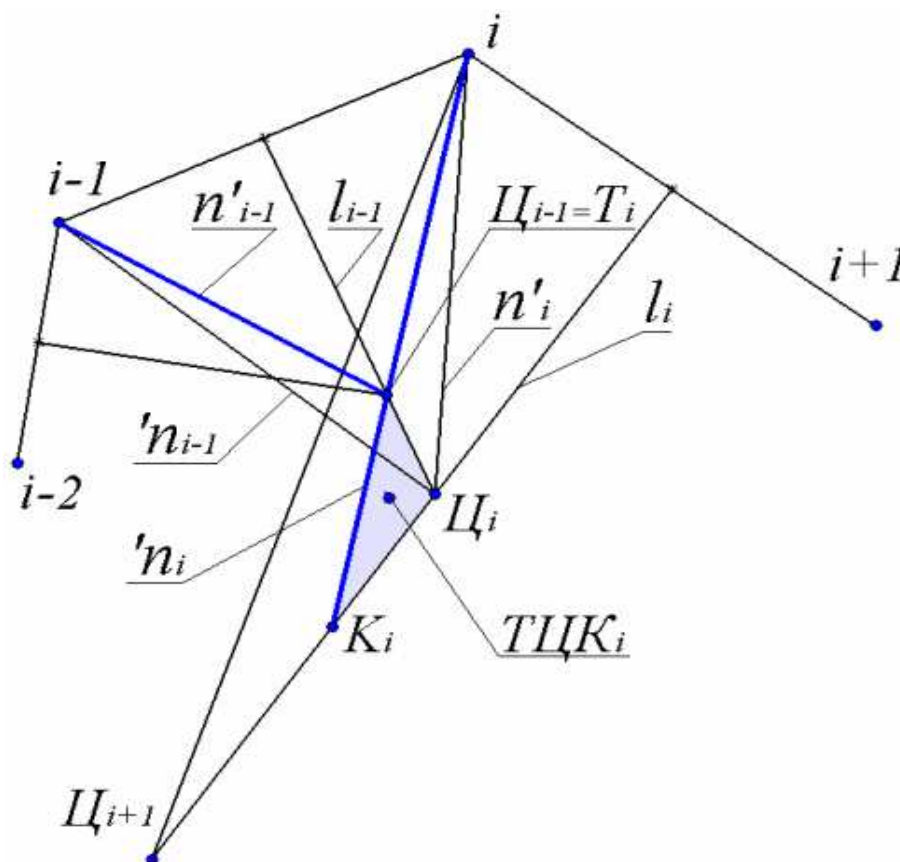


Рисунок 2

Якщо центр PK_{i-2} – точка C_{i-2} , розташовується за межами $T_{ck_{i-1}}$ (рис. 1), то положенням n_{i-1} є пряма $(i-1; C_i)$, а положенням n/i – пряма $(i; C_i)$. У разі коли точка C_{i-2} збігається з точкою T_{i-1} , положення n/i визначається проходженням через точку C/i – центр кола що проходить через вузли $i; i+1$ і дотичне з PK_{i-2} (див. рис. 3).

При призначенні C_{i-1} в точці C_{i-2} і вказаному положенні нормалі n_i , C/i – єдине можливе положення i -го центру кривини. І навпаки: при призначенні $i-1$ -го центру кривини в точці C/i єдине можливе положення i -го центру кривини – точка C_{i+2} . В цьому випадку ділянка ДПК $(i-3... i+1)$ формується двома дугами кіл, зістикованих з першим порядком гладкості. Поворот нормалі n_{i-1} проти годинникової стрілки відносно положення n_{i-1} є необхідною умовою формування обводу другого порядку гладкості з монотонною зміною кривини.

Якщо точка C_{i-2} належить відрізку $[i-1; C_i]$ (крайнє положення, при якому точка C_{i-2} збігається з точкою T_{i-1}), то точка C/i збігається з точкою C_i . Таким чином, аналіз взаємного розташування суміжних ТЦК показав, що уточнення вихідного положення n_{i-1} необхідно у разі, коли центр PK_{i-1} розташований за межами T_{ck_i} . Уточнення вихідного положення n/i необхідно у разі, коли центр PK_{i-2} – точка C_{i-2} , збігається з вершиною T_{ck_i} – точкою T_{i-1} . Уточнення положень n_{i-1} та n_i по критерію розташування $T_{ck_{i-1}}$ і T_{ck_i} не потрібно.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В статті запропонована методика уточнення області можливого розташування центрів кривини|кривини| ДПК з|із| монотонною зміною кривини|кривини|. Методика заснована на аналізі вихідного|початкового| точкового|крапкового| ряду|низки| і дозволяє зменшити зону пошуку оптимального, за умовами завдання,|задачі| рішення|вирішення|.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гавриленко Є.А. Визначення положення центрів кривини дискретно представленої кривої / Є.А. Гавриленко// Системні технології / Регіональний міжвузівський збірник наукових праць – Вип. 5 (76) - Дніпропетровськ, 2012. – с. 145-151.
2. Гавриленко Є.А. Визначення границь діапазонів положення центрів кривини плоского обводу / Є.А. Гавриленко// Прикл. геом.та інж. графіка / Праці ТДАТУ – Вип.4,т.52.–Мелітополь 2012.– с. 103-106.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАСТИНЫ СО СЖИМАЮЩИМИ ЕЕ ШТАМПАМИ ПРИ СИММЕТРИЧНОМ ДЕЙСТВИИ ТОРЦЕВЫХ НАГРУЗОК

Аннотация. Предлагается постановка задачи об исследовании процесса взаимодействия пластины со сжимающими ее жесткими штампами в результате действия симметрично приложенных торцевых нагрузок, одинаково изменяющихся во времени. На основе уточненной теории пластин получено решение поставленной задачи в конечных формулах. Проведено исследование зависимости положения границы областей сцепления и проскальзывания с трением, а также характера контактного взаимодействия между пластиной и штампами от величины прикладываемых торцевых нагрузок.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, нормальное контактное взаимодействие, касательное контактное взаимодействие, область сцепления, область проскальзывания с трением, пластина, жесткие штампы, торцевые нагрузки.

Введение. В работе [1] на основе уточненных уравнений теории пластин [2] с коэффициентами для рассматриваемого класса контактных задач [3] было начато исследование зависимости характера взаимодействия негладкой пластины со сжимающими ее плоскими штампами от значений прикладываемых торцевых нагрузок. В области контакта пластины и штампов в общем случае могут быть одновременно участки сцепления, проскальзывания с трением и отставания. Были установлены области значений торцевых нагрузок, при которых имеет место только сцепление по всей области контакта, только проскальзывание с трением по всей области контакта и полное отставание. Настоящая работа является продолжением работы [1]. Здесь исследуется зависимость расположения точек смены состояний сцепления и проскальзывания с трением в области контакта, а также ха-

раक्टर распределения контактных взаимодействий от значений симметрично приложенных торцевых нагрузок.

Постановка задачи. Рассматривается плоская деформация негладкой пластины толщины h и ширины $2l$, зажатой между плоскими штампами так, что заданы их поступательные перемещения W (рис. 1). К торцам пластины симметрично приложена продольная нагрузка, главный вектор которой P . Исследуется симметричный процесс: сначала пластина была обжата штампами путем задания их поступательного перемещения $\pm W$ при отсутствии торцевых нагрузок ($P = 0$), а затем были симметрично приложены нагрузки по торцам, одинаково изменяющиеся во времени. Ввиду симметрии этой задачи относительно плоскости $x = 0$, достаточно ограничиться рассмотрением лишь правой половины пластины $0 \leq x \leq a$, где a – полуширина области контакта, которая, несмотря на скругление штампов, приближенно считается равной полуширине штампа $a_{ш}$. Устанавливается зависимость между положением границы области сцепления и проскальзывания с трением и соответствующий характер распределения контактного взаимодействия от величины прикладываемой торцевой нагрузки P .

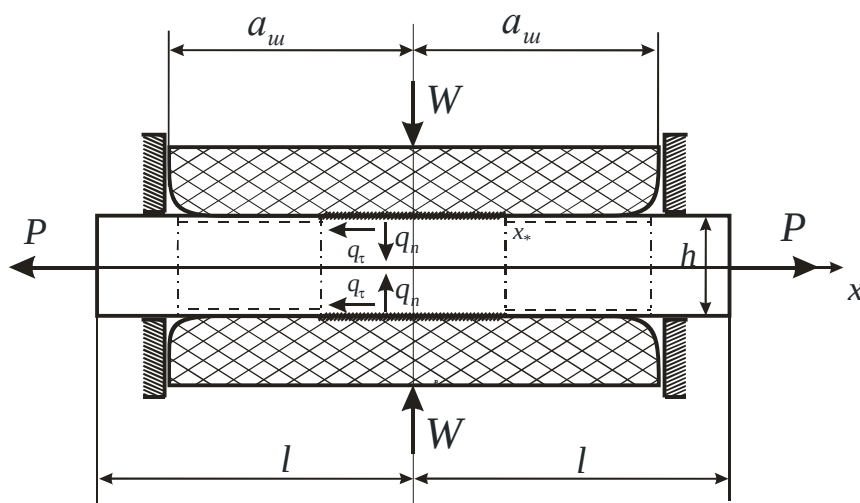


Рисунок 1

Построение решения. В работе [1] относительно касательного контактного взаимодействия $q_\tau(x)$ и нормального контактного взаимодействия $q_n(x)$ были получены разрешающие дифференциальные уравнения четвертого порядка для области сцепления и второго по-

рядка для области проскальзывания с трением. Для рассматриваемой задачи решения этих уравнений имеют вид:

– в области сцепления с учетом симметрии относительно плоскости $x = 0$:

$$\begin{aligned}
 q_{\tau}(x) &= q_{\tau}^{+} \cdot \frac{\frac{d\varphi_1(x)}{dx}}{\frac{d\varphi_1(x_*)}{dx}} - \frac{\sigma_1 \cdot \left(N_c^{+} + \frac{4vGW}{1-2v} \right) \cdot \varphi_2(x)}{2 \cdot \frac{d\varphi_1(x_*)}{dx}}, \\
 q_n(x) &= \frac{4(1-v)GW}{1-2v} - q_{\tau}^{+} \cdot \frac{v}{1-v} \cdot \frac{2\Psi_{11}(x)}{\sigma_1^2 \frac{d\varphi_1(x_*)}{dx}} - \frac{v}{1-v} \left(N_c^{+} + \frac{4vGW}{1-2v} \right) \frac{\Psi_{22}(x)}{\sigma_1 \cdot \frac{d\varphi_1(x_*)}{dx}}, \\
 V(x) &= -\frac{(1-v)\Lambda_1}{G} \left(q_{\tau}^{+} \cdot \frac{\frac{d\Psi_{31}(x)}{dx}}{\frac{d\varphi_1(x_*)}{dx}} - \frac{\sigma_1 \cdot \left(N_c^{+} + \frac{4vGW}{1-2v} \right) \cdot \Psi_{32}(x)}{2 \cdot \frac{d\varphi_1(x_*)}{dx}} \right); \quad (1)
 \end{aligned}$$

– в области проскальзывания с трением вправо:

$$\begin{aligned}
 q_{\tau}(x) &= \frac{2GW}{v} \left(\left(1 - \frac{v}{4GW} N_T^{+} \right) \cdot \Phi_1(x, a_T) - \left(1 - \frac{v}{4GW} N_T^{-} \right) \cdot \Phi_2(x, a_T) \right), \\
 q_n(x) &= \frac{1}{f} q_{\tau}(x), \quad V(x) = u_{\tau}(x) + \\
 &+ \frac{(1-v)\Lambda_1 W}{\Lambda_{31} v f} \left(\left(1 - \frac{v}{4GW} N_T^{+} \right) \cdot \Phi_3(x, a_T) - \left(1 - \frac{v}{4GW} N_T^{-} \right) \cdot \Phi_4(x, a_T) \right). \quad (2)
 \end{aligned}$$

Здесь:

$N(x)$ – продольные усилия в пластине, x_* – граница области сцепления, $q_{\tau}^{+} = q_{\tau}(x_*)$, $N_c^{+} = N(x_*)$, a_T – половина области проскальзывания с трением, $N_T^{-} = N_T(-a_T)$, $N_T^{+} = N_T(a_T)$, $V(x)$ – осредненные по толщине пластины продольные перемещения, u_{τ} – касательные перемещения точек лицевых поверхностей пластины соответственно, G , v – модуль сдвига и коэффициент Пуассона материала, f – коэффициент трения скольжения, $\Lambda_1 = 0,0025$, $\Lambda_{31} = 0,115$ – коэффициенты уточненной теории пластин, соответствующие рассматриваемому классу задач [3],

$$\varphi_1(x) = \frac{\operatorname{ch}(\tilde{\lambda}_1 x)}{\operatorname{ch}(\tilde{\lambda}_1 x_*)} - \frac{\operatorname{ch}(\tilde{\lambda}_2 x)}{\operatorname{ch}(\tilde{\lambda}_2 x_*)}, \quad \tilde{\lambda}_{1,2} = \sqrt{n_1 \pm \sqrt{n_1^2 - \sigma_1^2}},$$

$$\varphi_2(x) = \operatorname{th}(\tilde{\lambda}_2 x_*) \frac{\operatorname{ch}(\tilde{\lambda}_1 x)}{\operatorname{ch}(\tilde{\lambda}_1 x_*)} - \operatorname{th}(\tilde{\lambda}_1 x_*) \frac{\operatorname{ch}(\tilde{\lambda}_2 x)}{\operatorname{ch}(\tilde{\lambda}_2 x_*)},$$

$$n_1 = \frac{\frac{1}{12} + \frac{v}{1-v} \Lambda_{31}}{\Lambda_1},$$

$$\Psi_{11}(x) = 2k \frac{d^2 \varphi_1(x)}{dx^2} + \sigma_1^2 \varphi_1(x),$$

$$\Psi_{22}(x) = \frac{d^3 \varphi_2(x)}{dx^3} - 2(n_1 + k) \frac{d\varphi_2(x)}{dx},$$

$$\Psi_{31}(x) = \frac{d^2 \varphi_1(x)}{dx^2} - \beta_1 \varphi_1(x), \quad \Psi_{32}(x) = \frac{d^2 \varphi_2(x)}{dx^2} - \beta_1 \varphi_2(x),$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{1-v} \sqrt{\frac{1-2v}{\Lambda_1}}, \quad k = \frac{(1-2v)\Lambda_{31}}{2v(1-v)\Lambda_1}, \quad \beta_1 = \frac{2-v+12v\Lambda_{31}}{12(1-v)\Lambda_1},$$

$$\Phi_3(x, a_t) = \frac{d\Phi_1(x, a_T)}{dx} + \beta \cdot \Phi_1(x, a_T),$$

$$\Phi_4(x, a_t) = \frac{d\Phi_2(x, a_T)}{dx} + \beta \cdot \Phi_2(x, a_T),$$

$$\Phi_1(x, a_T) = \Phi(x, a, \lambda_1, \lambda_2), \quad \Phi_2(x, a) = \Phi(-x, a, -\lambda_1, -\lambda_2),$$

$$\lambda_{1,2} = n \pm \sqrt{n^2 - \sigma^2},$$

$$\Phi(x, a_T, \lambda_1, \lambda_2) = \frac{\exp(2\lambda_1 a_T) \cdot (\lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1(a_T + x)) - \lambda_2 \cdot \exp(-\lambda_2(a_T + x)))}{1 - \exp(-2(\lambda_2 - \lambda_1)a_T)}$$

Начнем с определения возможности одновременного образования областей сцепления и проскальзывания с трением в области контакта. С этой целью вначале предположим сцепление по всей области контакта. При этом контактные взаимодействия $q_\tau(x)$, $q_n(x)$ на всей области контакта вычисляем по формулам (1), граница области сцепления совпадает с шириной штампа $x_* = a$ и тогда $N_c^+ = P$, а постоянная q_τ^+ определяется из условия равенства нулю нормального кон-

тактного взаимодействия на границе $q_n^+ = 0$, поскольку концы штампов скруглены.

При $P=0$, $\nu=0,45$; $f=0,4$; $a=2$ результат вычислений приведен на рисунке 2. Как видно, в области $1,5 \leq |x| \leq 2$; $|q_\tau(x)| > f |q_n(x)|$, то есть имеет место тенденция к проскальзыванию по краям области контакта.

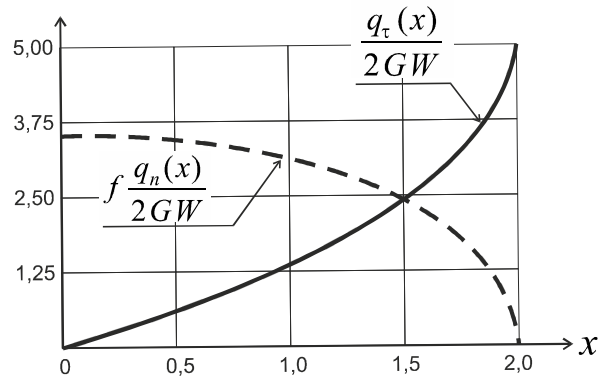


Рисунок 2

Теперь допустим наличие в области контакта двух состояний (x_* – точка перехода от сцепления к проскальзыванию):

– при $0 \leq x \leq x_*$ – область сцепления ($q_\tau(x)$, $q_n(x)$, $V(x)$ определяются формулами (1));

– при $x_* \leq x \leq a$ – область проскальзывания с трением ($q_\tau(x)$, $q_n(x)$, $V(x)$ определяются формулами (2)).

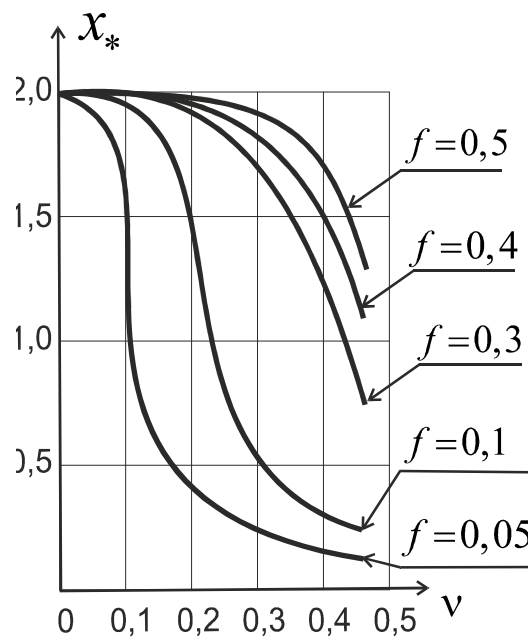


Рисунок 3

Используя краевое условие $N_T^+ = \frac{P}{h}$ и условие сопряжения $N_c^+ = N_T^- = N^*$ получим в формулах (1), (2) наличие трех констант q_τ^+ , N^* и x_* , для определения которых возьмем условия непрерывности $V(x)$ и $u_\tau(x)$ в точке $x = x_*$, а также дополнительные условия непрерывности нормального и касательного контактного взаимодействий. В результате получаем систему трех соотношений:

$$V(x_* - 0) = V(x_* + 0), \quad q_\tau^+ = q_\tau(x_* + 0), \quad q_n(x_* - 0) = q_n(x_* + 0), \quad (3)$$

которые в силу формул (1) – (2) будут представлять собой уравнения относительно этих констант. Решая систему (3), получаем зависимость искомых констант от соотношения $\frac{P}{2GWh}$, а также парамет-

ров ν и f . Следует отметить, что в начале процесса, когда $P = 0$, точка смены состояний x_* не зависит от интенсивности обжатия W . Ее зависимость от ν и f представлена на рисунке 3. Как и следовало ожидать, когда $\nu \rightarrow 0$, область проскальзывания стремится к нулю, если же $f \rightarrow 0$, область сцепления стремится к нулю.

При увеличении растягивающей силы P область сцепления уменьшается и при $\frac{P}{2GWh} \approx 4,44$ исчезает. При этом вместе с областью сцепления скачком исчезает и область проскальзывания, то есть пластина переходит в состояние полного отставания. При увеличении сжимающей силы область проскальзывания уменьшается до наступления полного сцепления. Зависимость величины области сцепления от величины $\frac{P}{2GWh}$ для $\nu = 0,45$; $f = 0,4$; $a = 2$ представлена на рисунке 4.

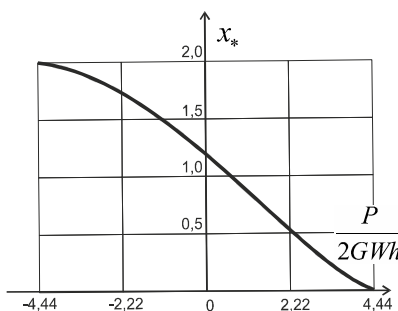


Рисунок 4

$\frac{P}{2GWh} \approx -4,27; -1,91; 0; 2; 3,47$ представлено на рисунке 5. В

окрестности точки смены состояний $x = x_*$ наблюдается тенденция к образованию разрыва в контактных взаимодействиях. Известно [4], что в постановке теории упругости при назначении точек смены состояний сцепления – проскальзывания функции контактного взаимодействия $q_\tau(x)$, $q_n(x)$ в этой точке имеют особенность, и для осуществления процесса необходимо потребовать выполнение условий:

$$\int_{x_*}^{x_* + \varepsilon} |q_\tau(x)| dx = \int_{x_* - \varepsilon}^{x_*} |q_\tau(x)| dx = f \int_{x_* - \varepsilon}^{x_*} |q_n(x)| dx. \quad (4)$$

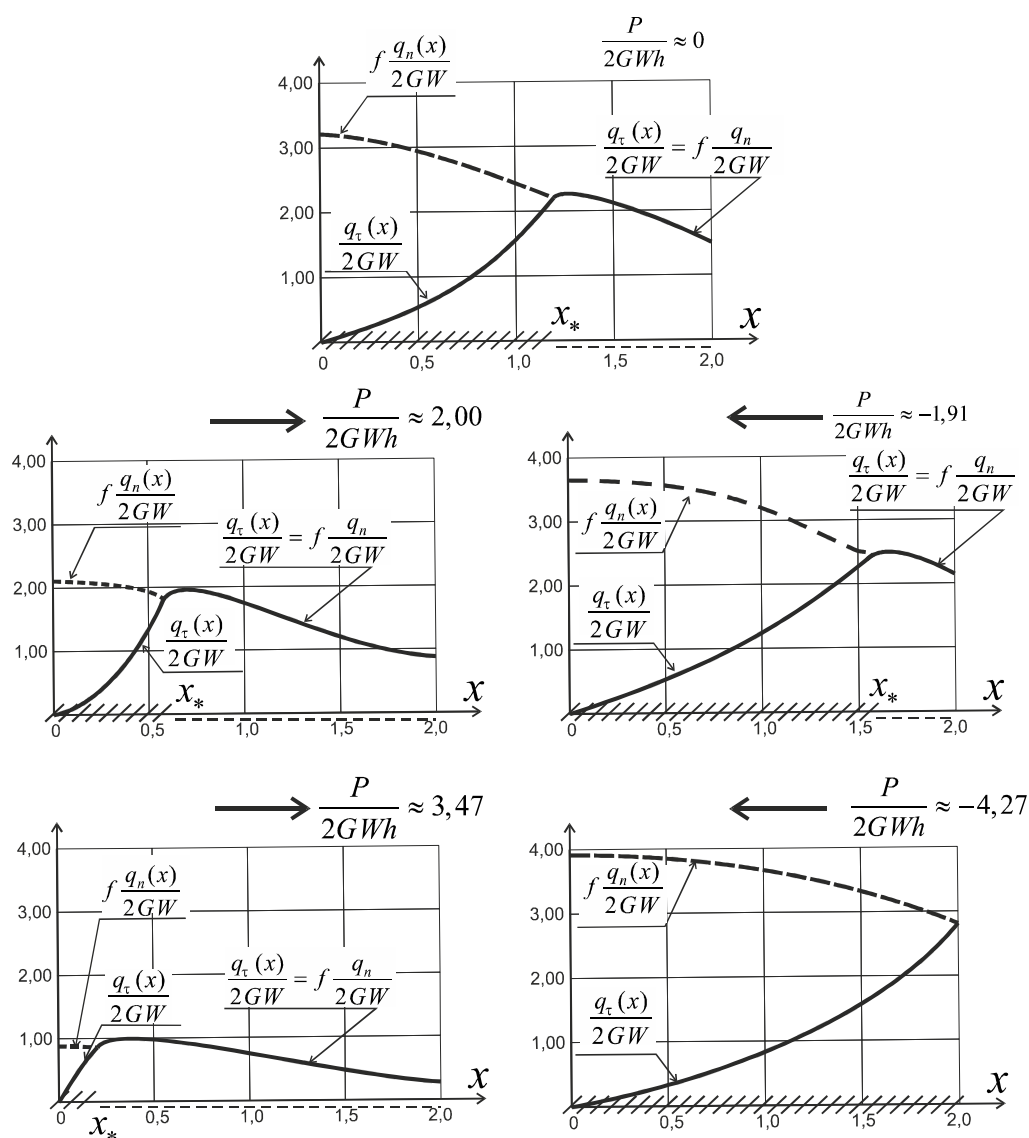


Рисунок 5

В постановке уточненной теории пластин, приемлемой для контактных задач, в рассматриваемой точке имеет место разрыв первого рода и, поэтому при рассмотрении процесса, интегральные условия (4) приближенно заменяются локальными

$$|q_\tau(x_* + 0)| = |q_\tau(x_* - 0)| = f |q_n(x_* - 0)|. \quad (5)$$

Можно показать, что если локальные условия (5) заменить интегральными (4), то в точке смены состояний $x = x_*$ контактные взаимодействия действительно будут претерпевать разрыв.

Выводы. На основе уточненной теории пластин получено аналитическое решение поставленной задачи.

Установлено, что в начале процесса, когда торцевые нагрузки равны нулю, положение границы областей сцепления и проскальзывания с трением не зависит от интенсивности обжатия, а зависит от коэффициента Пуассона и коэффициента трения скольжения. Исследование этой зависимости представлено графиками.

Получена зависимость положения границы областей сцепления и проскальзывания с трением от изменения торцевых нагрузок

Представлены графики распределения контактных взаимодействий в соответствующих областях контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наумова И.Ю. Исследование зависимости характера взаимодействия пластины со сжимающими ее штампами от значения торцевых нагрузок // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 4(69). – Днепропетровск, 2010. – С.11–22.
2. Григолюк Э.И., Толкачев В.М. Контактные задачи теории пластин и оболочек. М.: Машиностроение, 1980.
3. Наумова И.Ю. К решению контактных задач теории пластин в температурном поле // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 5(70). – Днепропетровск, 2010. – С.148–161.
4. Попов Г.Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тонких включений и подкреплений. – М.: Наука, 1982.

Ю.М. Ревенко

РОЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ СОЖ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ВЫРУБНЫХ ШТАМПОВ

Анотація. Запропоновано та теоретично обґрунтовано новий підхід до створення ефективних составів СОЖ для алмазного шліфування твердих сплавів, що базується на термодинамічному аналізі фізико-хімічних процесів, що протікають на ювенільних поверхнях. Встановлений характер впливу розробленого составу СОЖ на основні параметри даної обробки и розроблена математична модель оптимізації процесу алмазного шліфування твердого сплаву по критерію мінімальної питомої собівартості зйому матеріалу що обробляється.

Введение. Данная работа посвящена повышению производительности и качества алмазного шлифования рабочих элементов вырубных прецизионных штампов, изготовленных из твердых сплавов на основе карбидов вольфрама и кобальта.

Постановка задачи исследования. Анализ использования в народном хозяйстве Украины дефицитных вольфрамо-кобальтовых твёрдых сплавов показал, что в ближайшее время и в перспективе потребность в них будет расти. Основным резервом удовлетворения промышленности в этих сплавах является увеличение стойкости технологической оснастки, для изготовления которой они использовались. В частности, в электронной промышленности эти твёрдые сплавы фактически незаменимы при изготовлении вырубных прецизионных штампов по вырубке выводных рамок интегральных микросхем. Решение практических задач по повышению их стойкости может быть достигнуто за счёт применения при размерной обработке твёрдосплавных элементов штампов эффективных СОЖ.

Однако проблема создания высокоэффективных СОЖ для размерного алмазного шлифования твердых сплавов пока ещё не полно-

стью решена. Рекомендуемые СОЖ [1, 2, 3, 4] (например, СОЖ на основе 5% водного раствора стандартных эмульсолов ЭТ-2 и УКРИНОЛ-1, и СОЖ по а.с. №263799) не обеспечивают высокой эффективности обработки.

Ужесточение режимов резания с целью повышения производительности обработки при алмазном шлифовании твёрдых сплавов при применении этих СОЖ приводит к интенсивному засаливанию алмазных кругов и падению их стойкости, наблюдаются прижоги и микротрещины на обработанных поверхностях. Кроме того возникают значительные внутренние напряжения растяжения, что особенно недопустимо при работе обработанных деталей в условиях знакопеременных нагрузок, воздействующих, например, на рабочие элементы вырубных твердосплавных штампов [5, 6]. Всё это говорит об актуальности поставленной проблемы создания эффективной СОЖ для данной операции и необходимости продолжения исследования в данном направлении.

Целью работы является разработка нового эффективного состава СОЖ для алмазного шлифования твёрдосплавных деталей вырубных штампов на основе исследования существующих теорий о взаимодействии СОЖ с материалом детали и инструмента в процессе размерной обработки. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих теорий о характере взаимодействия активных технологических сред с материалом детали и инструмента в процессе размерной обработки.

2. Теоретически исследовать механизм протекания процессов в зоне резания при алмазном шлифовании твёрдого сплава, используя термодинамический метод анализа физико-химических процессов, протекающих на ювенильных поверхностях деталей.

3. На основе полученных результатов исследований разработать новый состав СОЖ для данной операции, который бы позволил повысить производительность и качество обработанных поверхностей.

4. Экспериментально исследовать влияние разработанного состава СОЖ на основные технологические характеристики процесса размерной обработки и установить аналитические зависимости между его выходными параметрами и технологическими факторами для оптимизации режимов резания.

Основное содержание. Рассмотрим процесс создания новой СОЖ на операциях алмазного шлифования инструментальной оснастки из твёрдых сплавов типа WC+Co. Последовательность разработки данной СОЖ была составлена на основе анализа литературных источников [1, 2, 3, 4] и собственного опыта в данной области [5, 6].

Этот процесс был условно разбит на 5 этапов: подготовительный, непосредственного создания СОЖ, экспериментальной проверки, доработки, доводки и внедрения СОЖ. Основным этапом явился первый, в котором был сформулирован критерий оптимальности процесса механической обработки для данной операции. Кроме того была изучена физико-химическая сущность явлений, происходящих в зоне резания, для определения тех, которые оказывают наибольшее влияние на критерий оптимальности. В качестве показателя эффективности обработки в данном случае была выбрана минимальная удельная себестоимость съёма твёрдого сплава с ограничением значений режимов резания по заданной шероховатости обработанной поверхности.

Физико-химические процессы, протекающие на ювенильных контактных поверхностях обрабатываемого материала и режущего инструмента с учетом активной технологической среды (СОЖ), исследовались на уровне микроконтактов зоны резания. Условия резания в микроконтактах в значительной степени отличаются от условий обработки в макрообъемах и, прежде всего, температурой. По данным С.А. Попова [8] при алмазном шлифовании твердого сплава без применения СОЖ средняя температура в зоне резания составляет примерно 600–900 °С. Использование существующих составов СОЖ позволяет снизить ее до 150–400 °С [8]. Однако, не смотря на применение СОЖ, значительно охлаждающих зону резания, на практике наблюдаются образование микротрещин и микровыколов на обработанных твердосплавных поверхностях, графитизация алмаза и диффузия углерода из алмаза [3, 8, 9], т.е. те физико-химические процессы, которые происходят при температурах, лежащих в диапазоне 600–900 °С и выше. Это можно объяснить тем, что при шлифовании в микроразонах контактов возникают температурные всплески, которые охватывают лишь субмикрообъемы металла и создают там очень высокую плотность энергии. Некоторые авторы [2] предполагают, что обрабатываемый материал и инструмент в зоне всплески частично оплавляются и даже переходит в плазменное состояние. Однако измерить

температуру на ювенильных поверхностях зоны резания в микрообъемах (имеющих размеры от нескольких микрон до его десятых долей) практически невозможно.

Автором данной работы была предложена гипотеза, что основным источником выделяющейся энергии на этом уровне являются пирореакции, которые возникают при взаимодействии обрабатываемых металлов, нагретых до средней контактной температуры зоны резания, с кислородом воздуха.

Энергетику этих реакций в микрообъемах можно качественно оценить по взаимодействию интерметаллических соединений (вольфрам-углерод и кобальт-углерод) с кислородом воздуха. Теплотворная способность этих элементов в пирореакциях достигает 10 МДж/кг, а развиваемая температура в молекулярных объемах 2500–3000°C [10]. Такое мощное энерговоделение в субмикрообъемах обуславливает интенсивное протекание химических реакций между материалом инструмента, обрабатываемой детали и активной технологической средой.

Для выявления процессов, уменьшающих эффективность алмазного шлифования твердого сплава, химические реакции, протекающие на ювенильных поверхностях микроконтактов зоны резания были описаны линейно-независимыми стехиометрическими соотношениями, представленными в таблице 1. Ввиду сложности экспериментального изучения этих реакций характер и возможность их протекания были исследованы с помощью термодинамического анализа.

Вычисление изменения энергии Гиббса (изобарно-изотерического потенциала), определяющего условия равновесия химических реакций, определяли по известной формуле [11]:

$$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T \cdot \Delta S^{\circ}, \quad (1)$$

где ΔG° - изменение энергии Гиббса, кДж/моль;

ΔH° - изменение энтальпии системы, кДж/моль;

ΔS° изменение энтропии системы, кДж/моль·К.

Индекс «0» записан для величин, относящихся к стандартному состоянию вещества (при давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па и данной температуре).

При $\Delta G < 0$ химические реакции протекают самопроизвольно, при $\Delta G > 0$ - реакции маловероятны, а при $\Delta G = 0$ - соответствуют пределу протекания реакций (условию равновесия).

Изменение каждой из термодинамических функций (ΔH° , ΔS°) определяют как алгебраическую сумму значений ее для соответствующих количеств начальных веществ и конечных продуктов реакции [11].

$$\Delta H^\circ = \sum_i (n_i \cdot \Delta H_{\psi i}^\circ)_{\text{прод}} - \sum_i (n_i \cdot \Delta H_{\psi i}^\circ)_{\text{исх}} ; \quad (2)$$

$$\Delta S^\circ = \sum_i (n_i \cdot S_{298,i}^\circ)_{\text{прод}} - \sum_i (n_i \cdot S_{298,i}^\circ)_{\text{исх}} , \quad (3)$$

где n_i – число молей вещества, i – равное стехиометрическому коэффициенту перед его формулой в уравнении реакции.

При термодинамическом анализе в качестве допущения была принята стационарность процессов (постоянство температуры, давления и концентрации реагентов). Кроме того было принято ограничение по температурному диапазону, т.е.: термодинамический потенциал ΔG° определялся в пределах 500-900°K.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Термодинамические расчеты показывают, что при температуре 627°С (900K) в субмикрообъемах зоны резания все записанные элементарные реакции протекают самопроизвольно. Наибольшее отклонение от равновесия при окислении алмазных зерен занимает их взаимодействие в зоне резания с кислородом воздуха, а затем следуют реакции с участием окислов кобальта и вольфрама. При снижении температуры до 227°С (500 K) маловероятными будут реакции с участием вольфрама и кобальта.

Таблица 1

Термодинамический анализ реакций системы

№ п/п	Реакции	ΔH° , кДж/моль	ΔS° , кДж/моль·K	ΔG , кДж/моль	
				T=500K	T=900K
1.	$2C_{\text{ал}} + O_2 = 2CO$	-224,82	+185,32	-317,48	-395,87
2.	$2CO + O_2 = 2CO_2$	-1008,08	-172,85	-921,67	-848,57
3.	$2Co + O_2 = 2CoO$	-475,6	-175,04	-389,58	-314,24
4.	$CoO + C_{\text{ал}} = Co + CO$	+126,94	+181,32	+36,28	-40,42
5.	$Co + CO = C_{\text{гр}} + CoO$	-349,83	-178,2	-260,73	-185,35
6.	$2WC + 5O_2 = 2WO_3 + 2CO_2$	-2554,84	+99,04	-2604,36	- 2646,25
7.	$2WO_3 + 3C_{\text{ал}} = 2W + 3CO_2$	+499,78	+547,35	+266,105	-5,424

Окислы металлов также способствуют окислению алмазных зерен, их абразивному износу, потере режущей способности алмазного круга, а следовательно, падению эффективности алмазного шлифования твердых сплавов в целом. Таким образом, для данной операции в зоне резания доминирующими являются процессы окисления алмазных зерен шлифовального круга кислородом воздуха с участием окислов вольфрама и кобальта.

Обобщение результатов проведенных теоретических исследований позволяет сформулировать помимо традиционных (смазочно-охлаждающих и моющих) следующие дополнительные функции СОЖ, используемых на операциях алмазного шлифования твердых сплавов:

- обеспечивать уменьшение интенсивности пиропроцессов с участием кислорода воздуха в зоне субмикрореконтактов при резании;
- растворять и пластифицировать продукты окисления вольфрама и кобальта твердых сплавов, предохраняя алмазные зерна от окисления и абразивного износа.

В результате проведенных исследований был разработан новый состав СОЖ для алмазного шлифования твердых сплавов [12, 13]. При его использовании происходит ингибирование пиропроцессов с помощью флюсующих веществ. Это обеспечивается за счет высокоэффективной эвтектики из буры, триполифосфата натрия и борной кислоты хорошо растворимых в воде.

В зоне высоких температур после испарения воды образуется подвижный щелочной борофосфатный расплав ($\text{Na}_x\text{B}_y\text{P}_2\text{O}_5$), обладающий хорошей адгезией как к твердому сплаву, так и к алмазному зерну. Образующиеся на поверхности и в микротрещинах окислы кобальта и вольфрама растворяются в этом расплаве, вязкость которого повышается. Полученный расплав предохраняет поверхность от воздействия кислорода и окисляющего действия воды и образует эффективную смазочную пленку с переменным градиентом вязкости, обеспечивая оптимальный гидродинамический режим трения.

На этапе экспериментальной проверки разработанной СОЖ ДИИ-3 были проведены лабораторные испытания ее оптимального состава в сравнении с СОЖ на основе 5% водного раствора стандартного эмульсола УКРИНОЛ-1, широко используемого на предприятиях страны при алмазном шлифовании твердых сплавов. Испытания про-

водились в лаборатории резания кафедры АМ-2 МВТУ им. Н.Э. Баумана [14].

Для установления характера влияния составов СОЖ на динамические параметры алмазного шлифования твердых сплавов (силы резания, шероховатость обработанной поверхности, удельный расход алмазов и удельную интенсивность съема) была использована экспериментальная установка, состоящая из модернизированного универсально-заточного станка мод. ЗД642Е с механизированным приводом поперечной подачи; трехкомпонентного динамометра мод. УДМ-100, шлейфового осциллографа и тензометрической станции. Тарирование динамометра производилось до и после проведения экспериментов путем его статического нагружения и разгрузки грузом весом 50Н в направлениях, соответствующих действию измеряемых усилий. Тарировочные графики составляющих P_z и P_y силы резания имели линейный характер и их взаимное влияние друг на друга не превышало 2-3%.

В качестве шлифуемых образцов были приняты пластинки твердого сплава марки ВК8 формы 0227А (обрабатывалась поверхность сечения 15×6 мм), закрепляемых блоками по 4 штуки в головке динамометра, установленной с специальным приспособлении на столе станка. Обработка велась торцом алмазного круга формы 12А2-45° размером 150×10×3, зернистостью 80/63, связкой Б1, 100% концентрации. Алмазные зерна круга использовались марки АСР без металлического покрытия. СОЖ подавалась в зону резания поливом.

Перед началом эксперимента частота вращения круга определялась с помощью тахометра. Правка круга осуществлялась на специальном станке (после закрепления круга на его шпиндель) методом шлифования кругом из карбида кремния зеленого КЗ, зернистостью 40, на керамической связке, твердостью С2. Биение круга после правки не превышало 0,01 мм. Перед правкой круг балансировали на специальном приспособлении. Продольная подача устанавливалась с помощью масштабной линейки и секундомера. Поперечная подача контролировалась индикатором, закрепленным в специальной скобе. Измерение шероховатости производилось с помощью профилометра мод. 253.

Для установления удельного расхода алмазов при шлифовании использовался линейный метод определения износа алмазных кругов

путем измерений координат точек режущей поверхности по методике МВТУ им. Н.Э. Баумана [14] с помощью оптического длинномера ИЗВ-2. Погрешность измерения на этом приборе не превышает $\pm 0,5$ мкм.

Исследование влияния составов СОЖ и режимов резания на характер изменения тангенциальной P_z и нормальной P_y составляющих силы резания, износостойкость алмазного круга и шероховатость обработанной поверхности проводились при различной производительности шлифования (от 1,2 до 7,2 мм³/с). Производительность обработки варьировалась в диапазоне подач и скоростей, соответствующих условиям чистового и получистового шлифования твердых сплавов. Скорость продольного перемещения стола $S_{пр}$ изменялось от 25 до 75 мм/с, поперечная подача $S_{п}$ варьировалась от 0,02 до 0,04 мм/дв.ход при постоянной высоте шлифуемой поверхности $h=6$ мм. $V_{кр}$ изменялась в пределах 17,5-35 м/с. Длина хода стола ограничивалась 75 мм (с помощью конечных выключателей) при длине блока обрабатываемых твердосплавных пластин – 60 мм.

Для сокращения объема необходимого числа опытов использовался метод математического планирования экспериментов, позволяющий получить научно-обоснованные, с заданной надежностью и точностью результаты. В данном случае был проведен полный факторный эксперимент для трех факторов (V_k , $S_{пол}$, $S_{пр}$) на двух уровнях. Для исследования каждой из СОЖ было проведено по 8 опытов и было сошлифовано 320 г твердого сплава. В качестве выходных параметров рассматривались P_z , P_y , R_a , и q . Основные эксплуатационно-технологические свойства сравниваемых СОЖ представлены в таблице 2 и 3. Анализ этих экспериментальных данных, полученных при алмазном шлифовании твердых сплавов показал, что использование СОЖ ДИИ-3 вместо 5% раствора эмульсола УКРИНОЛ-1 позволяет значительно уменьшить составляющие силы резания. Так, P_y уменьшается в 1,7-2, P_z в 1,8-2,3 раза, а шероховатость поверхности R_a улучшается в 1,5 раза. Одним из важных параметров, характеризующими эффективность алмазного шлифования твердых сплавов является износостойкость кругов, определяется удельным расходом алмазов q (мг/м).

Таблица 2

Технико-экономические показатели алмазного шлифования твердого сплава с использованием СОЖ ДИИ-3

№ п/п	Режимы резания			Выходные параметры					$\frac{Q_c}{P_y}$, мм ³ /Н·с
	V , м/с	S_n , мм/хд	S_{np} , мм/с	R_a , мкм	P_z , Н	P_y , Н	q , мг/г	Q_c , мм ³ /с	
1	17,5	0,01	25	0,083	8,6	27,9	1,48	1,2	0,043
2	17,5	0,01	75	0,133	12	43	2,15	3,6	0,084
3	35	0,01	75	0,068	8,7	28	2,94	3,6	0,129
4	35	0,01	25	0,043	6,2	19,4	1,38	1,2	0,062
5	35	0,02	25	0,060	10,6	34,4	2,61	2,4	0,070
6	35	0,02	75	0,091	16	51,7	5,0	7,2	0,139
7	17,5	0,02	25	0,120	16,4	53,6	2,25	2,4	0,045
8	17,5	0,02	75	0,173	24	75,2	4,5	7,2	0,096

Таблица 3

Технико-экономические показатели алмазного шлифования твердого сплава с использованием 5% водного раствора эмульсола УКРИНОЛ-1

№ п/п	Режимы резания			Выходные параметры					$\frac{Q_c}{P_y}$, мм ³ /Н·с	Примечание
	V , м/с	S_n , мм/хд	S_{np} , мм/с	R_a , мкм	P_z , Н	P_y , Н	q , мг/г	Q_c , мм ³ /с		
1	17,5	0,01	25	0,125	17,5	50	2,51	1,2	0,024	
2	17,5	0,01	75	0,213	28	78	5,3	3,6	0,046	
3	35	0,01	75	0,098	20	56	5,7	3,6	0,064	
4	35	0,01	25	0,061	13	34,4	2,79	1,2	0,035	
5	35	0,02	25	0,087	24	66,7	5,72	2,4	0,036	
6	35	0,02	75	0,153	36	99,5	12,1	—	—	На обрабо- танной по- верхности наблюдаются прижоги, микротреци- ны и микро- выколы
7	17,5	0,02	25	0,185	35	96	5,2	2,4	0,025	
8	17,5	0,02	75	0,259	44,5	133	11	—	—	На обрабо- танной по- верхности наблюдает- ся прижоги, микротре- щины и микровыко- лы

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что наибольшее влияние на износ алмазных кругов с органической связкой оказывают составы используемых при шлифовании СОЖ. Так, при одном и том же изменении режимов резания (S_{np} , $S_{пр}$, V_k) с использованием в качестве СОЖ 5%-ного раствора эмульсола УКРИНОЛ-1 удельный расход неметаллизированных алмазов лежал в пределах от 2,51 до 12,1 (мг/м). При применении новой СОЖ ДИИ-3 этот диапазон значительно уменьшился и стал равным 1,48 – 5,04 (мг/г), т.е. уд. расход алмазов уменьшился от 1,7 до 2,2 раза. Использование кругов с металлизированными алмазными зернами позволяет согласно литературных данных [3] еще дополнительно в 2-3 раза снизить удельный расход алмазов (q) и расширить сферу применения кругов на органической связке в сравнении с кругами на металлических и органометаллических связках при чистовом, получистовом и черновом алмазном шлифовании твердых сплавов. Повышение износостойкости алмазных кругов при использовании СОЖ ДИИ-3 можно объяснить уменьшением вероятности возникновения пирореакций в микроконтактах зоны резания и значительным снижением температуры в объемах на этом же уровне, которая разрушает алмазные зерна и связку круга. Кроме того исключается отрицательное действие на органическую связку высокой щелочности СОЖ УКРИНОЛ-1, резко снижавшую прочность удержания алмазных зерен в круге, и он изнашивался в основном за счет вырывания из связки практически неиспользованных алмазов. В составе СОЖ ДИИ-3 предусмотрен компонент, уменьшающий ее водородный показатель (Ph), и соответственно предохраняющий бакелитовую связку от набухания и преждевременного разрушения. Для оценки эффективности алмазного шлифования многие исследователи [8, 9] широко применяли в качестве критерия удельную интенсивность шлифования $K = Q_c / P_y$ (мм³/Н·с). Из таблиц 2 и 3 видно, что при торцовом шлифовании твердых сплавов наибольшее влияние на этот коэффициент из режимов резания оказывает продольная подача. Так, при изменении S_{np} в 3-и раза при постоянных V_k и S_{non} K увеличивается в 2-а раза, в то же время S_{non} в 2-а раза вызывает возрастание показателя K всего лишь на 5-10%. Это можно объяснить тем, что при увеличении S_{np} темпы роста нормальной составляющей силы резания ниже,

чем при соответственном изменении S_{non} . Так, например, при использовании СОЖ ДИИ-3 изменение S_{np} в 3-и раза (с 25 до 75 мм/с) вызывает возрастание P_y в 1,5 раза, а при увеличении S_{non} в 2-а раза (с 0,01 до 0,02 мм/ход) примерно во столько же раз повышается P_y .

Это связано с тем, что рост поперечной подачи повышает плотность контакта алмазного круга с твердым сплавом и увеличивает сечение единичного среза, вызывающих пропорциональный рост нормальной составляющей силы резания, которая и снижает по абсолютной величине показатель K . Поэтому оптимизацию режимов резания при торцовом алмазном шлифовании твердых сплавов с целью повышения производительности и качества обработанной поверхности желательно проводить за счет увеличения продольной, а не поперечной подачи.

Анализ экспериментальных данных, приведенных в таблицах 2 и 3, показал, что наибольшее влияние на удельную интенсивность алмазного шлифования при плоском торцовом шлифовании оказывают составы применяемых СОЖ. Так, при использовании СОЖ ДИИ-3 в пределах заданных режимов показатель K изменяется в диапазоне 0,043-0,139 (мм³/Н·с), а при применении СОЖ УКРИНОЛ-1 он лежит в пределах 0,024-0,064, т.е. режущие свойства алмазного круга при использовании нового эффективного состава возрастает в два раза.

Рядом исследований [8, 9] установлено, что наиболее объективным и универсальным критерием оценки эффективности алмазного шлифования твердых сплавов является удельная себестоимость съема обрабатываемого материала, подсчитываемая по формуле С.А. Попова [8]

$$C = a_1 \cdot q + \frac{a_2}{Q_m} \text{ (коп/г)}, \quad (4)$$

где a_1 – стоимость 1 мг алмаза (коп/г);

q – удельный расход алмаза шлифовального круга (мг/г);

Q_m – производительность процесса (г/60·с);

a_2 – заработная плата рабочего (коп/60·с).

Затраты, связанные с правкой круга и дополнительными расходами составляют по предварительным данным менее 10%, поэтому как незначительные по величине в расчете они опущены. Тогда себестоимость сошлифовки 100 мм³ твердого сплава можно выразить через выражение (4) следующей зависимостью:

$$C_{100} = a_1 \cdot q \cdot \gamma \cdot \frac{100}{1000} + \frac{a_2}{60 \cdot Q_c}, \quad \left(\frac{\text{коп}}{100 \text{ мм}^3} \right) \quad (5)$$

где γ - плотность твердого сплава ВК8, $\gamma = 14,6 \text{ мг/мм}^3$.

Подставим в данное выражение (5) ее составляющие.

Себестоимость съема 100 мм^3 твердого сплава примет следующий вид:

$$C_{100} = 0,073 \cdot q + \frac{1,67}{Q_c}. \quad (6)$$

Данные расчетов C_{100} , полученные с использованием этого уравнения подтверждают эффективность применения нового состава СОЖ при алмазном шлифовании твердого сплава кругами на органической связке. Удельная себестоимость съема твердого сплава в заданном диапазоне режимов резания с использованием СОЖ ДИИ-3 в 1,5-1,8 раза ниже, чем при применении на этой операции СОЖ на основе 5% водного раствора стандартного эмульсола УКРИНОЛ-1. Для полного использования резервов повышения эффективности алмазного шлифования твердого сплава с применением СОЖ ДИИ-3 необходим выбор оптимальных режимов, соответствующих минимальной удельной себестоимости обработки материала.

Математическая обработка экспериментальных данных (таблица 2), полученных при торцовом алмазном шлифовании твердых сплавов кругами на органической связке с использованием ЭВМ при помощи стандартной программы «ОМЕГА», позволила получить следующие зависимости выходных параметров от режимов резания:

$$q = 1,42 \cdot S_{\text{поп}}^{0,606} \cdot S_{\text{пр}}^{0,47} \cdot V_{\text{кр}}^{0,417} \text{ (мг/г);} \quad (7)$$

$$R_a = 1,03 \cdot S_{\text{поп}}^{0,30} \cdot S_{\text{пр}}^{0,375} \cdot V_{\text{кр}}^{-0,816} \text{ (мкм).} \quad (8)$$

После подстановки в уравнение 6 значений q и Q_c , выраженных через режимы резания, оно примет следующий вид:

$$C_{100} = 0,104 \cdot S_{\text{поп}}^{0,61} \cdot S_{\text{пр}}^{0,47} \cdot V_{\text{кр}}^{0,48} + 0,36 S_{\text{поп}}^{-1} \cdot S_{\text{пр}}^{-1}. \quad (9)$$

Расчет минимальной удельной себестоимости обработки с использованием данной зависимости осуществляется на ЭВМ итерационным методом по стандартной программе «MINFG» [15] (вычисление глобального минимума функций нескольких переменных). В качестве ограничения использовалась допустимая шероховатость обработанной поверхности $R_a \leq 0,32 \text{ мкм}$. В результате расчета для алмазного тор-

цового шлифования твердого сплава при использовании СОЖ ДИИ-3 алмазными кругами на органической связке была установлена минимальная удельная себестоимость обработки C_{100} мин, которой соответствуют следующие оптимальные режимы:

$$V_{кр} = 35 \text{ м/с}, S_{non} = 0,02 \text{ мм/ход}, S_{np} = 75 \text{ мм/с}.$$

Лабораторные испытания СОЖ ДИИ-3 на операции торцового алмазного шлифования твердого сплава по сравнению с СОЖ УКРИНОЛ-1, широко применяемой на предприятиях страны, свидетельствуют о том, что новая СОЖ позволяет в 2-а раза повысить производительность обработки и износостойкость алмазных кругов, и в 1,5 раза улучшить шероховатость обработанной поверхности.

Полученные данные хорошо коррелируют с результатами производственных испытаний и внедрения СОЖ ДИИ-3 на предприятии п/я М-5203 на операциях алмазного шлифования твёрдых сплавов [5, 12]. В результате внедрения СОЖ в производство в 2-а раза повысилась производительность обработки и износостойкость алмазных кругов, на 20% увеличилась стойкость вырубных прецизионных штампов. Высокая эффективность внедрения разработанной СОЖ в производстве подтверждает достоверность исходных предпосылок о сущности физико-химических процессов в зоне резания при алмазном шлифовании твёрдых сплавов, положенных в основу её создания.

Предлагаемая СОЖ ДИИ-3 может быть успешно применена для алмазного шлифования твёрдых сплавов при изготовлении вырубных и высадочных штампов, керамики, прессформ и другой технологической оснастки во всех отраслях машиностроения, предприятиях электротехнической и электронной промышленности, а также на предприятиях Министерства цветной металлургии.

Выводы.

1. Предложен и обоснован новый подход к созданию эффективных составов СОЖ для алмазной обработки твёрдых сплавов, базирующийся на термодинамическом анализе физико-химических процессов, происходящих на ювенильных поверхностях микроконтактов зоны резания.

2. Теоретически показано, что основным фактором, ухудшающим эффективность данных операций является наличие пиропроцессов и окисления алмазных зёрен шлифовального круга на уровне микроконтактов зоны резания с участием окислов вольфрама и ко-

бальта, находящихся на обрабатываемых поверхностях и в микро-трещинах твёрдого сплава.

3. Сформулированы дополнительные требования к компонентам проектируемых СОЖ (помимо традиционных: смазочных, охлаждающих и моющих) для алмазного шлифования твёрдого сплава: уменьшать активность пиропроцессов с участием кислорода воздуха в микроконтактах зоны резания; растворять и пластифицировать продукты окисления вольфрама, предохраняя алмазные зёрна от окисления и абразивного износа.

4. Предложены аналитические зависимости, устанавливающие связь между удельной себестоимостью съёма обрабатываемого материала и технологическими факторами, которые позволяют с помощью ЭВМ определить оптимальные режимы резания для конкретных условий алмазного шлифования твёрдых сплавов с использованием новых эффективных СОЖ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абразивная и алмазная обработка материалов /Под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. -361с.
2. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием / Под ред. М.И. Клушина. – М.: Машиностроение, 1979. -192с.
3. Рыбицкий В.А. Алмазное шлифование твёрдых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1980. -224с.
4. Худобин Л.В. О сущности процесса засаливания и смазочном действии внешних сред при шлифовании // Вестник машиностроения. – М., 1970. – №6. –С. 52-55.
5. Повышение эффективности применения СОЖ на операциях алмазного шлифования режущей оксидно-карбидной керамики и твёрдых сплавов. Отчёт о НИР/ДИИ. Руков. темы В.П. Силкин, отв. исп. Ю.М. Ревенко. Г.Р. №808883. Инв. №3156. – Днепродзержинск, 1979. -108с.
6. Ревенко Ю.М., Педан В.П. Создание эффективных смазочно-охлаждающих жидкостей для обработки металлов и сплавов / Днепро-дзерж. инд. ин-т. – Днепродзержинск, 1982. -32с. – Деп. в УкрНИИНТИ, 1983, №32Ук–Д83.
7. Ревенко Ю.М. Повышение эффективности размерной обработки твёрдосплавных деталей вырубных прецизионных штампов. – Автореф. канд. дисс. – Москва: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987. -16с.
8. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твёрдых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. -263с.

9. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб и др. – К.: Техника, 1978. -192с.
10. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Н. Основные характеристики горения. – М.: Химия, 1977. -320с.
11. Киреев В.А. Методы практических расчётов в термодинамике химических реакций. 2-е изд. испр. и доп. – М.: Химия, 1975. -536с.
12. Ревенко Ю.М. Новая СОЖ для алмазного шлифования керамики. – Запо-рожье, ЦНТИ, 1981. -3с. Информ. листок №81-22.
13. А.С. 836077 (СССР). Смазочно-охлаждающая жидкость для алмазной обработки керамических изделий / Ю.М. Ревенко, А.К. Маскаев, А.К. Караулов и др. – Оpubл. в Б.И. 1981, №21.
14. В.Н. Подураев, Ю.М. Ревенко, С.Г. Васильев. Новая СОЖ для алмазного шлифования твёрдых сплавов // Станки и инструмент. – М., 1990. – №1. –С.21-23.
15. Программа обеспечения ЭВМ. Пакет научных программ института математики, часть 18. – Минск: АН БССР, 1981, выпуск 34. –С.58.

Д.Г. Зеленцов, Н.Ю. Науменко, Л.В. Новикова

**АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТЬЮ ЧИСЛЕННОГО
РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ СИСТЕМ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

Анотація. У статті наводиться докладний аналіз застосовності отриманих раніше залежностей у вигляді аналітичних функцій довговічності стержневого елемента довільного перерізу, що підлягає корозійному зносу. Пропонується підхід, заснований на використанні математичного апарата теорії катастроф, за допомогою якого пояснюються особливості поведінки функцій довговічності.

Введение. Среди задач строительной механики значительный интерес представляет задача моделирования поведения конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред. Одним из последствий такого воздействия является коррозионный износ – разрушение поверхностного слоя металла и, как следствие, изменение начальных геометрических характеристик конструкции, снижение её несущей способности и преждевременный выход из строя. Поведение корродирующей конструкции может быть исследовано путём численного решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих процесс коррозии в её элементах. От точности решения СДУ зависит точность решения задачи в целом, поэтому проблема выбора параметров численных процедур, которые обеспечили бы её решение с заданной точностью и с минимальными вычислительными затратами, приобретает самостоятельное значение. Для решения данной проблемы в настоящей работе предлагается использование искусственных нейронных сетей. В качестве объекта исследования рассматриваются статически неопределённые шарнирно-стержневые системы в условиях воздействия сильноагрессивных сред.

Постановка задачи. В большинстве случаев механические напряжения в элементах конструкции приводят к ускорению коррозионного процесса, что нашло отражение в различных моделях корро-

зионного износа [1, 2]. В общем виде дифференциальное уравнение, описывающее коррозионный износ, имеет вид:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \cdot \psi(\sigma), \delta|_{t=0} = 0, \quad (1)$$

где δ – глубина коррозионного поражения; t – время; v_0 – скорость коррозии при отсутствии напряжений; σ – абсолютная величина напряжения; ψ – некоторая известная функция.

На изменение напряжения в i -м элементе системы оказывает влияние два фактора: уменьшение площади сечения этого элемента A_i и изменение осевого усилия Q_i , которое для статически неопределимых конструкций зависит от жёсткостных характеристик всех элементов $Q_i = Q_i(\bar{\delta})$. С учётом этого СДУ, описывающая коррозионный процесс в элементах статически неопределимых систем, имеет вид:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \cdot \Psi_i(\sigma_i(\delta_i, Q_i(\bar{\delta}))), \delta_i|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N} \quad (2)$$

Так как решение задачи напряженно-деформированного состояния (НДС) для конструкции с произвольной геометрией, граничными условиями и условиями нагружения возможно только численно, функция напряжений имеет вид вычислительного алгоритма, как правило – метода конечных элементов [3]. Таким образом, решение СДУ (2) также возможно только численно, например, методом Эйлера:

$$\delta_i^s = \delta_i^{s-1} + \Delta t^s \cdot v_0 \cdot \psi \left(\sigma_i^{s-1} \left(\bar{\delta}^{s-1} \right) \right), \quad (3)$$

где Δt^s – шаг интегрирования СДУ на s -й итерации.

Очевидно, что точность численного решения СДУ зависит от величины шага интегрирования, а также алгоритма его изменения в процессе решения задачи. Несмотря на то, что за последнее десятилетия проблеме моделирования поведения корродирующих конструкций уделялось значительное внимание, в известной литературе не встречается обоснованных рекомендаций относительно параметров численных методов. Один из алгоритмов управления точностью решения СДУ вида (2), использующий искусственную нейронную сеть (ИНС), предложен, очевидно, впервые, в работе [4]. При этом для решения СДУ был использован метод Эйлера с постоянным шагом интегриро-

вания. В этой работе использовались сигмоидальные функции активации, что позволило применить для обучения сети алгоритм обратного распространения ошибки.

В работах [5-7] предложен и обоснован эффективный численно-аналитический алгоритм решения СДУ, описывающих коррозионный процесс в шарнирно-стержневых системах (ШСС) и пластинах в условиях плоского нагружения и изгиба. Для таких конструкций получены аналитические формулы, позволявшие определить время, за которое напряжение в элементе конструкции увеличивается от σ_0 до σ . Так, например, для стержня при осевом нагружении эта формула имеет вид:

$$t_{\text{ан}}^* = t_0 - \frac{2kQ}{v_0 \cdot |d|} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{2a\delta - P_0}{|d|} + \operatorname{arctg} \frac{P_0}{|d|} \right\}, \quad (4)$$

Здесь A_0 , P_0 – площадь и периметр сечения в начальный момент времени; Q – величина осевого усилия; $t_0 = \frac{\delta^*}{v_0}$; a – коэффициент формы сечения; $c = A_0 + kQ$; $d = \sqrt{|P_0^2 - 4ac|}$; $d \neq 0$; δ^* – глубина коррозионного износа, соответствующая предельному состоянию элемента.

Значение δ^* для растянутого стержня может быть определено из решения квадратного уравнения

$$A_0 - P_0\delta + a\delta^2 = \frac{Q}{[\sigma]}, \quad (5)$$

где $[\sigma]$ – предельно допустимое значение напряжения.

Эта формула получена для модели коррозионного износа, предложенной В.М. Долинским [8]:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \cdot (1 + k \cdot \sigma(\delta)), \quad (6)$$

где k – коэффициент влияния напряжений. При этом значение осевого усилия Q полагается постоянным, и данная формула может быть использована для определения долговечности статически определимых ШСС, когда изменения усилий в их элементах не происходит. При исследовании статически неопределимых конструкций она не может быть применена непосредственно.

В известных численно-аналитических алгоритмах предлагается использовать равномерный шаг по напряжению, $\Delta\sigma = \frac{[\sigma] - \sigma_0}{n} = \text{const}$, а соответствующее значение Δt определить по формуле (4). К преимуществам этого алгоритма следует отнести более высокую точность, отсутствие необходимости уточнения результата решения, а также то, что в последней точке (для $\sigma = [\sigma]$) задача НДС не решается (рис. 1).

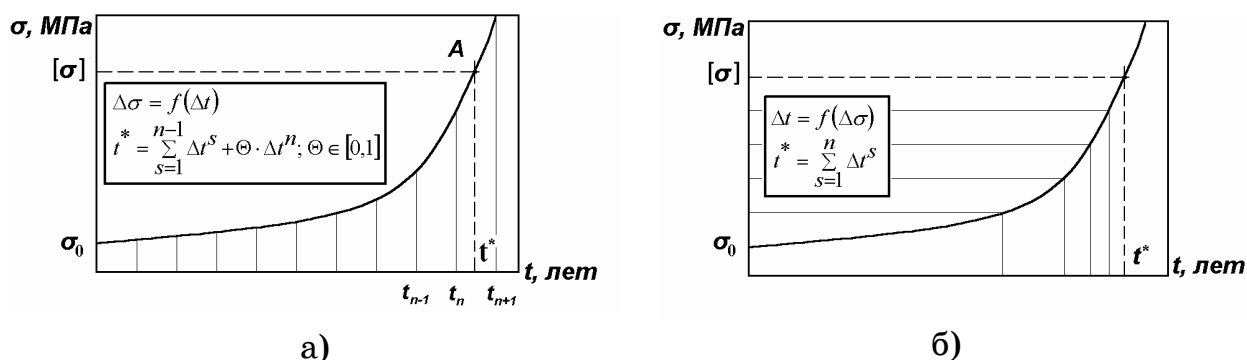


Рисунок 1 – Численное (а) и численно-аналитическое (б) решение задачи долговечности

Очевидно, что точность численно-аналитического алгоритма будет зависеть от количества точек разбиения интервала $(\sigma_0; [\sigma])$. Постановка задачи управления точностью предполагает определение такого наименьшего количества точек разбиения интервала изменения напряжения, чтобы погрешность численно-аналитического алгоритма не превышала предельно допустимого значения $[\epsilon]$.

Алгоритм управления точностью решения СДУ. Для управления точностью решения при использовании численно-аналитического алгоритма требуется нейронная сеть с целочисленной функцией активации для выходного элемента, в отличие от нейронной сети, описанной в [4].

На основании анализа факторов, влияющих помимо шага интегрирования, на точность решения СДУ, который приведен в [4], авторами предложена нейронная сеть с пятью входными элементами, семью элементами скрытого слоя, и одним входным элементом (рис. 2).

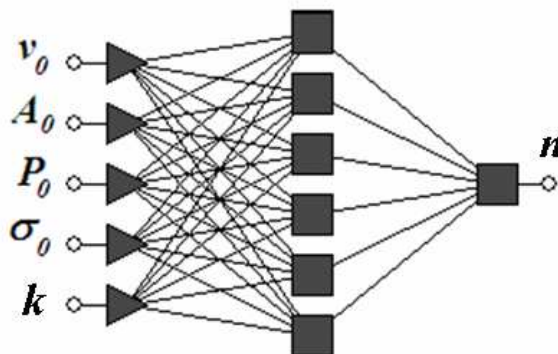


Рисунок 2 – Архитектура нейронной сети

Входными параметрами сети являются: начальная площадь A_0 и периметр P_0 , начальное напряжение σ_0 , скорость коррозии v_0 и коэффициент влияния напряжения на скорость коррозии k . Выходной элемент – минимальное количество шагов по напряжению n , при котором обеспечивается заданная точность численного решения СДУ.

В качестве функции активации скрытого слоя использовалась сигмоидальная функция вида:

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-c \cdot x)}, \quad (7)$$

Для выходного элемента принималась кусочно-непрерывная функция:

$$f(x) = \text{int} \left\{ \frac{k}{1 + \exp(-c \cdot x)} \right\} + 1, \quad (8)$$

Необходимое число образцов N для обучения сети определялось на основании рекомендаций, приведенных в [9]:

$$N \geq \frac{W_{\Sigma}}{\varepsilon}, \quad (9)$$

где W_{Σ} – количество весовых коэффициентов сети, ε – заданная допустимая погрешность сети. При $W_{\Sigma} = 50$ и заданной погрешности $\varepsilon \leq 0,005$, для обучения сети было использовано 10 000 образцов.

Алгоритм обучения ИНС. Использование формулы вида (7) исключает возможность применения алгоритма обратного распространения ошибки для обучения сети. Поэтому в работе для этой цели был использован вещественный генетический алгоритм [10].

Генетические алгоритмы имитируют процесс эволюции популяции как циклический итерационный процесс, во время которого к популяции применяются основные биологические операторы: селекция, кроссовер, мутация.

Применительно к данной задаче генетический алгоритм используется для минимизации (по коэффициентам матриц весов) функции средней ошибки сети

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_n(\bar{\omega}) - z_n| \rightarrow \min. \quad (10)$$

Здесь y_n – вектор выходных значений НС, зависящий от значений всех весовых коэффициентов $\bar{\omega}$, z_n – вектор эталонных значений.

Для решения задачи минимизации применялся вещественный генетический алгоритм с использованием простейшего и эвристического операторов кроссовера. Количество хромосом принималось равным количеству весовых коэффициентов НС, то есть 50. Обучение проводилось для заданных значений погрешности численного решения 0,025; 0,05 и 0,075; решение достигалось не более, чем за 130 эпох. При этом значение функции ошибки (10) не превышало 0,035.

Процедура получения обучающей выборки. Как отмечалось выше, на изменение напряжения в i -м элементе оказывают влияние два фактора: изменение геометрических характеристик и изменение величины внутренних усилий. Как показано в [6], влияние первого фактора значительно превосходит влияние второго. Таким образом, если известно количество интервалов n , обеспечивающих необходимую точность численно-аналитического алгоритма при постоянных значениях усилий ($Q_i = \text{const}$), то и при изменяющихся усилиях данная точность будет обеспечена. Поэтому аналитическая формула (4) может быть использована для обучения НС.

Входные данные НС для одного образца выбирались случайным образом. Для удобства рассматривались стержни кольцевого сечения с внешним радиусом R и внутренним r . Произвольное сечение стержня с площадью A и периметром P с высокой степенью точности может быть сведено к кольцевому сечению с радиусами $R = \frac{P}{2\pi}$ и

$r = \sqrt{\frac{4A - P^2}{4\pi}}$. Для полученных параметров стержня аналитически

решалась задача долговечности при $\delta^* = R - \sqrt{\frac{Q}{\pi[\sigma]} + r^2}$. Затем задача

расчёта долговечности решалась численно и проводилась оценка численного решения $\varepsilon = \varepsilon(n)$. Минимальное количество интервалов n , при котором выполнялось неравенство $\varepsilon(n) \leq [\varepsilon]$ считалось эталонным выходным значением для данного образца.

Анализ результатов. Для иллюстрации возможностей нейросетевого алгоритма управления точностью была решена задача определения долговечности 5-стержневой статически неопределимой фермы, представленной на рис. 3.

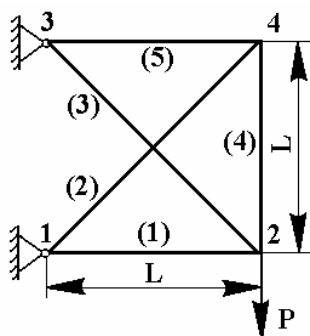


Рисунок 3 – Расчетная схема фермы

Параметры фермы и агрессивной среды полагались известными: $L = 200$ см; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $[\sigma] = 240$ МПа; $v_0 = 0,1$ см/год, $k = 0,003$ МПа⁻¹. Все стержни имели кольцевое сечение с внешним радиусом $R = 4,0$ см и внутренним $r = 3,0$ см. Допустимая погрешность численного решения $[\varepsilon] = 0,05$. Для определения погрешности использовалось эталонное значение

долговечности конструкции. Эталонное решение определялось с помощью численно-аналитического алгоритма при последовательном увеличении количества шагов интегрирования. Предельное количество шагов интегрирования n определялось из условия:

$$|t(n) - t(n-1)| \leq 0,0001. \quad (11)$$

Предельное состояние конструкции определялось условием исчерпания несущей способности (ограничением по устойчивости) элемента (2). Некоторые результаты решения задачи для нагрузки представлены в таблице 1. Здесь приведены значения напряжений в элементе фермы (2) в различные моменты времени, определяемые по формуле (4) для величины внешней нагрузки $P = 250$ кН. Количество итераций решения СДУ, полученное с помощью нейронной сети для

данной конструкции, равнялось восьми. Эталонное решение, найденное при 43 итерациях, $t_{\text{эт}} = 3,339$ года.

Таблица 1

n	t, лет	Δt , лет	σ , МПа	σ^* , МПа
-	0,000	-	71,06	161,92
1	0,996	0,996	82,60	155,76
2	1,697	0,701	93,31	151,41
3	2,217	0,520	103,31	148,17
4	2,615	0,398	112,64	145,67
5	2,926	0,311	121,28	143,70
6	3,170	0,244	129,15	142,14
7	3,359	0,189	136,03	140,93
8	3,489	0,130	139,28*	139,25*

Погрешность численно-аналитического решения, полученного при восьми итерациях, равнялась $\varepsilon = 0,0449$. Отметим, что численно-аналитический алгоритм не предполагает решение задачи НДС на последней итерации; приведенные в таблице значения текущего и критического напряжений в момент исчерпания несущей способности конструкции (при $t^* = 3,489$ года) были получены путём дополнительных расчётов.

Выводы. Результаты решения задачи определения долговечности корродирующей фермы подтверждают высокую эффективность численно-аналитического алгоритма, использующего нейросетевой модуль выбора количества итераций для решения СДУ данного класса. Использование нейросетевого модуля позволяет обеспечить требуемую точность решения задачи при минимальных вычислительных затратах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г., Почтман Ю.М. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа. Расчет и оптимизация. – Днепропетровск: ДГУ, 1995. – 192 с.
2. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. – Саратов: СГУ, 1987. – 288 с.

3. Зеленцов Д.Г., Кольчик С.В. Моделирование процесса коррозионного износа в задачах оптимального проектирования конструкций, использующих метод конечных элементов // Компьютерные методы в задачах прикладной математики и механики. Сб. научн. трудов ИК НАН Украины. – К., 1998. – с. 40 – 47.
4. Зеленцов Д.Г., Короткая Л.И. Использование нейронных сетей при решении задач долговечности корродирующих конструкций // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М.Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3 (68), част. 1. – С. 24 – 27.
5. Зеленцов Д.Г. Об одном алгоритме решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений // Придніпровський науковий вісник. Фізико-математичні науки. – 1998. – № 112 (179). – С. 31 – 37.
6. Зеленцов Д.Г., Филатов Г.В. Обзор исследований по применению методов нелинейного математического программирования к оптимальному проектированию конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой // Вопросы химии и химической технологии. – 2002. – № 4. – С. 108 – 115.
7. Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю. Напіваналітичні алгоритми розв'язання систем диференціальних рівнянь у задачах довговічності кородуючих конструкцій // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2008. – № 4. – С. 14 – 18.
8. Долинский В.М. Изгиб тонких пластин, подверженных коррозионному износу // Динамика и прочность машин, Харьков, 1975. – Вып. 21. – с.16 –19.
9. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
10. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.

В.Л. Зубов

ВЫПЛАВКА ФЕРРОСИЛИЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ В ШИХТЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Анотація. Було проаналізовано та узагальнено сучасний стан питання технології виплавки ферросиліцію із залученням у виробництво відновлювальних сумішей замість кокса-горіха. Було наведено результати промислових випробувань виплавки ферросиліцію марки ФС65 із використанням відновлюючих сумішей, що містять окрім кокса-горіха антрацит та довгополуменеве вугілля.

Ключові слова: ферросиліцій, кокс-горіх, відновлююча суміш, антрацит, довгополуменеве вугілля.

Традиционная технология выплавки ферросилиция всех марок предусматривает использование в шихте кварцита, коксика-орешка и стальной стружки. Многолетняя практика производства ферросилиция в мощных ферросплавных закрытых печах с учетом постоянного исследования и совершенствования технологии, включая подготовку шихтовых материалов, выбор рациональных электрических и газодинамических режимов плавки, позволили к настоящему времени стабилизировать весь комплекс параметров производства ферросилиция, конкурентоспособного на международных рынках.

Вместе с тем постоянный рост цен на коксик-орешек и электроэнергию обуславливают необходимость продолжения активного поиска путей снижения себестоимости ферросилиция. Одним из направлений решения задачи повышения эффективности выплавки ферросилиция, как и других ферросплавов, является использование в шихте восстановительных смесей состоящих из коксика-орешка антрацита самостоятельно или в смеси с другими каменными углями [1].

Постановка задачи вовлечения в технологию производства ферросплавов и, в частности, ферросилиция, антрацита, каменных углей в текущее время приобрела особую актуальность [2].

В ретроспективе актуальность решения этой задачи обсуждалась в ряде монографий [3, 4] и научно-технических статьях. Однако широкого опытно-промышленного освоения и, тем более, постоянного использования антрацита самостоятельно или в смеси с каменными углями различных марок взамен части кокса-орешка, не было. Несомненно, что металлургический кокс соответствует сложившимся требованиям к углеродистому восстановителю для выплавки ферросилиция, а именно: подходящими значениями удельного электросопротивления, пониженной склонностью к графитации при температурах процесса получения ферросилиция, широко развитой пористостью для возможно полного «улавливания» монооксида кремния и др.

Антрациты, как и каменные угля, также имеют ряд присущих им отличительных физических и физико-химических свойств, что позволяет в нынешних условиях рассматривать их как компоненты шихты для выплавки ферросплавов. Одной из преград более широкого использования антрацита при выплавке ферросилиция в смеси с коксиком-орешком является сложившееся у некоторой части исследователей, технологов ферросплавного производства негативное отношение к нетрадиционным видам углеродистых восстановителей. Как правило, это отношение оправдывается сложной зависимостью изменения удельного электросопротивления антрацитов с повышением температуры, склонностью их к графитации, низкой пористостью и др. Вместе с тем, практически не уделяется внимание изучению комплекса свойств различных антрацитов, каменных углей, (например, петрографических характеристик органического вещества ископаемых углей), учет которых позволил бы на научной основе провести выбор наиболее подходящих видов и марок твердых угольных восстановителей.

Следует особо отметить, что термин антрацит охватывает совокупность высокометаморфизованных ископаемых углей различного происхождения (регионально-метаморфизированного, термально-контрактного), образованных влиянием процессов динамометаморфизма [5].

Антрациты Донецкого бассейна отличаются своеобразием не только по петрографическому составу (повышенное содержание витринита до 95%), содержанию серы, но и составу золы (высокое содержание оксидов железа, кальция и магния). Катионы этих метал-

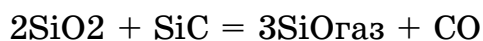
лов, а также Na и K оказывают интенсифицирующее действие на процессы восстановления кремния углеродом. Относительно низкое содержание Al_2O_3 в составе золы, способствует получению ферросилиция с меньшей концентрацией алюминия.

Для выбора антрацита как восстановителя, особенно важно располагать данными о петрографическом составе органического вещества. По данным института «ВНИГРИуголь» петрографический состав донецкого и горловского (Россия) антрацитов существенно различаются, что следует из приведенных ниже данных (в мас. %) [5, 6]:

Антрацит	Витринит, VA	Семивитринит, SV	Интертинит, I
Донецкий	86,3	3,4	8,3
Горловский	51,8	26,7	20,0

Причем витринит антрацитов также существенно отличается от витринита каменных углей. Важным показателем свойств антрацитов является состав органических микрокомпонентов и, в частности, группы графинита, которые бывают мелкозернистыми, мелкокристаллическими и др., что в определенной мере определяет склонность антрацитов к графитации.

Отмечают, что карбид кремния, образовавшийся как промежуточный продукт восстановительного процесса в системе Si-O-C при использовании различных видов углеродистых восстановителей и, следовательно, различного петрографического состава органического вещества, имеет также различную реакционную способность в реакциях его взаимодействия с SiO_2 и $SiO_{газ}$



что в значительной мере определяет температурно-временные условия процесса получения ферросилиция.

Важнейшей термодинамической характеристикой ископаемых углей является теплота (энтальпия) их образования. По данным [7] численные значения величин теплоты образования в ряду метаморфизма углей позволяет получать информацию о процессах, протекающих при метаморфизме твердых горючих ископаемых и при использовании их в качестве энергоносителей или восстановителей в ферросплавном производстве.

В соответствии с законом Гесса теплота образования угля $\Delta H_{обр.уг.}^o$ равна теплоте образования продуктов сгорания $\Delta H_{обр.пр.}^o$ за вычетом теплоты его сгорания $\Delta H_{сгор.уг.}^o$, или

$$Q_{обр.уг.} = \sum V_i Q_i^o - Q_s^{daf},$$

где V_i - стехиометрические коэффициенты для продуктов сгорания угля; Q_i^o - стандартные теплоты сгорания C, H, N и S; Q_s^{daf} - удельная высокая теплота сгорания сухого беззольного топлива (в МДж/кг).

Авторы [6] разработали методику и рассчитали величину $Q_{обр.уг.}$ для ископаемых углей различной степени метаморфизма Кузбасса.

$$Q_{обр.уг.} = -10,5C_5 + 0,0045 C_4 - 0,789 C_3 + 69,481 C_2 - 3048,9 C + 53382,$$

$$Нат/Сат = 3,945C_2 - 2,0459 C + 0,0893.$$

Ими было установлено, что с увеличением содержания органического углерода в углях теплота образования их уменьшается, а с ростом атомного отношения Нат/Сат повышается.

Кинетику и механизм восстановления кремния из кварцита Банического месторождения (Украина) исследовали [8] при использовании различных восстановителей в интервале температур 1473-2273 К при мольном соотношении $SiO_2:C=1:2$. Результаты изменения скорости процесса восстановления SiO_2 углеродом различных восстановителей при 1823-1973 К аппроксимированы уравнением

$$V = K \cdot C_{SiO_2}^n,$$

где V - скорость расхождения расчета; K - константа скорости реакции, (размерность $ккал \cdot моль^{-1} / (RT)$), n - порядок реакции.

В промышленных опытах выплавки кристаллического кремния в печах Иркутского и Братского алюминиевых заводов использовали стандартную шихту (100 кг кварцита, 21 кг древесного угля, 10 кг нефтекокса, 35 кг каменного угля и 64 кг щепы) и четыре опытные шихты, в которых количество каменного угля поддерживали как и в базовой шихте 35 кг, а нефтекоксы частично заменяли ангарским полукоксом. Подтверждено, что все опытные шихты с каменным углем и полукоксом позволили повысить извлечение кремния на 1,0-1,2% и снизить удельный расход электроэнергии на 5,8%. Увеличение доли ангарского полукокса в навеске сверх 13,3 кг при использо-

вании низкосортных кварцитов Антоновского месторождения (Россия) приводило к ухудшению качества выплавляемого кремния. Таким образом, применение каменного угля в составе шихты для выплавки кристаллического кремния до 35 кг на 100 кг кварцита обеспечивает улучшенные показатели производства кристаллического кремния.

Приведенные выше и другие особенности петрографического состава органического вещества ископаемых углей, в значительной мере определяют их термодинамические характеристики, физические свойства и, в конечном счете, их свойства как углеродистых восстановителей. В связи с этим решение проблемы вовлечения антрацита, каменных углей в аспекте фундаментальных исследований их природы находится в начальной стадии. Наряду с изучением означенных выше проблемных задач, не менее важными являются теоретические и экспериментальные исследования обоснования грансостава кварцита, коксика и антрацита (длиннопламенного угля), чтобы обеспечить требуемое электрическое сопротивление содержимого ванны печи, достаточную газопроницаемость и высокое извлечение кремния в ферросилиций.

Промышленное освоение технологии выплавки ферросилиция было начато с замены в составе колоши шихты коксика-орешка антрацитом в количестве 30% (102 кг коксика; 42 кг антрацита) и 20% (120 кг коксика и 27 кг антрацита). Антрацит и коксик характеризовались переменным гранулометрическим составом, что следует из приведенных ниже данных (мас.дол, %) [9]:

Таблица

Фракция, мм	+25	20-25	16-20	10-16	6-10	-6
Антрацит	10,1- 44,9	8,4- 17,3	15,7- 27,4	19,1- 48,7	1,9-8,9	3,2-7,3
Коксик	-	0,3- 1,4	4,4-20,1	55,8- 67,1	11,3- 26,4	4,2-13,3

Антрацит имел следующий состав: углерод 80,3%, летучие 3,4%, сера 1,8%, зола 14,5%. Из-за вынужденного простоя печи по причине отключения провести плавки с 30% антрацита с составлением баланса не представилось возможным. Поэтому плавки ферроси-

лиция в опытный период велись с 20% антрацита взамен коксика. Результаты опытно-промышленной кампании подтвердили принципиальную возможность частичной замены коксика антрацитом. Для улучшения технологического процесса рекомендовано проведение дальнейших опытов с использованием смеси антрацита с длиннопламенным углем улучшенного грансостава.

Опытно-промышленная кампания выплавки ферросилиция ФС65 с частичной заменой коксика донецким антрацитом марки АМ и длиннопламенным углем марки ДПМ проведена на ПАО «ЗФЗ» в цехе 4 на печи № 34. Составы углеродистых восстановителей и фактическое соотношение твердого углерода, вносимого каждым видом восстановителя, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Составы коксика, антрацита и длиннопламенного угля и соотношение восстановителей по твердому углероду (в мас.%)

Восстановитель	Ств	Летучие	Сера	Зола	Влага	Использование восстановителя по твердому углероду
Коксик	83,4	2,5	1,6	12,5	17,9	72,3
Антрацит	86,3	4,3	1,8	7,2	4,6	14,9
Длиннопламенный уголь	52,7	42,0	1,0	4,3	14,7	12,8

Грансостав углеродистых восстановителей свидетельствует, что антрацит поступал с меньшей долей фракции +25, хотя количество мелкой фракции минус 6 колебалось от 3,9% до 31%. Относительно много фракции (плюс 25) имелось в длиннопламенном угле.

В период проведения опытно-промышленной кампании технологический процесс характеризовался следующими показателями: устойчивая токовая нагрузка и посадка электродов 2,6-2,8 м; равномерный сход шихты, нормальная работа газовых трактов газоочистки; удовлетворительная жидкоподвижность шлака и нормальный выпуск его из ванны печи; в системе газоочистки и радиальных отстойниках пенистых осадков не наблюдалось.

Основные технико-экономические показатели производства ферросилиция ФС65 в опытную кампанию в сравнении с базовым периодом приведены в табл.2.

При анализе данных табл.2 следует учитывать, что за базовый период приняты данные работы этой же печи № 34 (цеха № 4) в более ранний период. Поэтому несколько меньшая фактическая мощность печи и соответственно производительность не является предметом обсуждения, тем более, что фактическая производительность печи на 1000 кВт составила 3,14 т (опытный период) и 3,12 т (базовый период), т.е. практически была одинакова. Удельный расход электроэнергии в опытный период составил 7643 кВт.ч/т и в базовый 7685,1 кВт.ч/т. Недостаточное фактическое количество суммарного углерода в опытный период 783,3 кг/т против 822,7 кг/т (базовый период) обусловлено большим угаром длиннопламенного угля на колошнике печи, что потребовало корректировки навески смеси восстановителей.

Таблица 2

Технико-экономические показатели выплавки ферросилиция марки ФС65 в опытный (ОП) и базовый (БП) периоды

Наименование показателей	Единица измерения	Значение показателя	
		БП	ОП
Продолжительность периода	сут.	20,9	19,76
Фактическая мощность печи	кВт	17645,1	17201,42
Фактическая производительность	т/сут	55	51,2
Фактическая производительность	т/1000 кВт	3,12	3,14
Удельные расходы материала:	кг/баз.т		
кварцит		1655,2	1653,3
коксик		822,7	559
антрацит		-	111,1
длиннопламенный уголь		-	156,2
Всего восстановителя		822,7	826,3
Всего восстановителя по		653,0	644,8

Ств			
стальная стружка		369,8	352,0
окалина		11,6	49,8
отходы		35,2	35,2
электродная масса		30,9	32,3
Удельный расход электро- энергии	кВт.ч/баз.т	7685,1	7644,6
Извлечение кремния	%	86,8	86,8
Всей шихты в факт.сутки	т	169,73	160,75
Удельный расход шихты	т/1000 кВт	9,62	9,34

По разработанной технологии за 9 месяцев (февраль-октябрь 2001г.) использовано 2133 т антрацита и выплавлено 31434 т ферросилиция марки ФС65, по всем показателям удовлетворяющего нормам межгосударственного стандарта ГОСТ 1415-93.

Таким образом, промышленная кампания выплавки ферросилиция ФС65 подтвердила возможность использования в шихте антрацита и длиннопламенного угля взамен части коксика. С учетом меньшей стоимости антрацита и длиннопламенного угля, примерно на 30% в сравнении с коксиком, применение более дешевой смеси углеродистых восстановителей позволило снизить себестоимость ферросилиция.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Зубов В.Л., Овчарук А.Н., Гасик М.И. Физико-химические свойства, структурные характеристики углеродистых восстановителей и их применение при выплавке ферросилиция. Днепропетровск. – ГНПП «Системные технологии». – 2001. – 144с.
- 2.Развитие технологии выплавки ферросилиция на ОАО «Кузнецкие ферросплавы»/С.Ф.Павлов, И.М.Кашлев, В.Н.Толстогузов, К.И.Кравцов, А.В.Астахов// «Сучасні проблеми металургії» Том 6. Прогресивні енерго-і ресурсозберігаючі технології та обладнання в електротермії феросплавів. Днепропетровск, «Системные технологии». 2003. – С.215-220.
3. Дуррер Р., Фолькерт Г. Металлургия ферросплавов: Пер. с нем.- М.: Металлургия. – 1976. – 480с.
- 4.Мизин В.Г., Серов Г.В. Углеродистые восстановители для ферросплавов. М.: Металлургия. – 1976. – 272с.

5. Еремин И.В., Броновец Т.М. Марочный состав углей и их рациональное использование./Справочник. М.: Недра. – 1994. – 254с.
- 6.Бычев Р.М., Петрова Г.И., Бычев М.И. Теплота образования углей// Химия твердого топлива. - 2001. №5. – С.34-41.
7. Толстогузов Н.В. О режиме углерода при плавке ферросилиция в мощных рудно-термических печах//Изв. высш. учебн. заведений. Черная металлургия. – 1992. - №4. –С.19-21.
8. Ратманов А.В. Интенсификация процесса выплавки кремния при использовании продуктов термической обработки каменных углей. Автореферат канд. диссертации. Иркутск. – ИПИ. – 1990. – 19с.
- 9.Промышленное освоение технологи выплавки ферросилиция с заменой в шихте коксика антрацитом и длиннопламенным углем/В.Л.Зубов, В.Д.Белан, Ю.А.Голов, А.Л.Фишман, Г.И.Быков, М.И.Гасик, А.Н.Овчарук// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002.- №1. – С.21-25.

В.Ф. Пожидаев, Н.С. Прядко, О.В. Грачев

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГО РАЗМЕРА КЛАССА
КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. В данной работе предложен метод вычисления среднего размера класса крупности частиц сыпучих материалов, основанный на физических принципах. Найденная приближенная формула расчета среднего диаметра опробована для распределения частиц угля по классам.

Ключевые слова: крупность, среднее значение, обогащение.

Интенсификация извлечения полезных ископаемых требует уменьшения удельных затрат на извлечение классов крупности полезного продукта. Это в свою очередь, тесно связано с предельным законом распределения частиц по размерам [1]. Вопрос о распределении частиц по размерам внутри узкого класса крупности неотделим от вопроса об эквивалентном диаметре частиц этого класса. От метода определения среднего размера класса зависит точность расчетов в задачах обогащения полезных ископаемых, связанных с крупностью частиц.

Вопрос о нахождении среднего диаметра тесно связан с понятием определяющих физических признаков, которые требуется сохранить при моделировании. Чисто статистическое понимание среднего как математического ожидания случайной величины в данном случае лишено физического содержания [1].

Цель исследования – разработка метода вычисления среднего размера частиц при распределении их по классам крупности.

Будем считать известными значения a, b, γ где a и b – граничные диаметры класса крупности (a, b) и γ – выход этого класса.

Пусть $F(x)$ – функция распределения в весовых долях. Обозначим через $f(x)$ и $\Phi(x)$, соответственно, плотность и функцию распределения случайной величины x в вероятностном смысле. Между функциями $F(x)$ и $\Phi(x)$ существует взаимнооднозначная связь. Най-

дем представления функции ϕ и Φ , справедливые внутри интервала (a, b) .

Средний диаметр частиц $z(x)$ в интервале $(a, x) \subseteq (a, b)$ можно определить как математическое ожидание случайной величины при условии попадания ее в интервал (a, x) . Тогда значение $z(x)$ может быть определено из уравнения

$$z(x) \int_a^x \phi(x) dx = \int_a^x x \phi(x) dx. \quad (1)$$

Это же уравнение дает возможность найти плотность распределения $\phi(x)$, если известна эквивалентная крупность $z(x)$.

Если определяющими признаками являются совокупный объем и совокупная поверхность частиц, то

$$\int_a^x f(x) dx = z(x) \int_a^x \frac{f(x) dx}{x}. \quad (2)$$

Здесь $f(x) = F'(x)$ – плотность функции распределения в весовых долях. Точные результаты можно получить, если известна функция $F(x)$. Для аппроксимации кумулятивной кривой воспользуемся модифицированным, усеченным на отрезке $(0, D)$ законом Вейбулла

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\alpha(D/x - 1)^{-\nu}\right\}, \quad (3)$$

где α и ν параметры распределения, определяемые по результатам гранулометрического анализа.

Для z в интервале (a, b) справедливо выражение

$$z = \frac{\gamma D}{\gamma + \alpha \nu T(\nu - 2, \alpha, \nu, D/\alpha - 1, D/6 - 1)}, \quad (4)$$

где

$$T(p, \alpha, \nu, a, b) = \int_a^b x^p e^{-\alpha x^\nu} dx = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\alpha^k}{k!} \cdot \frac{b^{p+\nu k+1} - a^{p+\nu k+1}}{p + \nu k + 1}. \quad (5)$$

Был проведен расчет величины z по формуле (4) для 20 различных сортов шламов углеобогачительных фабрик Донбасса. Эти расчеты использовались для сравнения с приближенными методами [2]. Недостатки такого подхода очевидны. Помимо выхода γ класса (a, b) , необходимо знать параметры всей кумулятивной кривой, т.е. весь гранулометрический состав. Хотя результаты и получаются наи-

более точными, однако, как рабочий инструмент, такой подход не является удовлетворительным.

В силу сказанного, представляется целесообразным получить приближенную, однако удобную для практических применений формулу для вычисления величины z . Исходить будем из формулы (1). Разобьем интервал (a, b) на два равновесных интервала, получим

$1/z = \frac{1}{2}(1/a + 1/b)$. Разбивая на три интервала, найдем аналогично

$\frac{1}{Z} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{a} + \frac{2}{a+b} + \frac{1}{b}\right)$. Дробя диапазон (a, b) на k интервалов, т.е. по-

лагая, что в этом диапазоне существует k – компонентная смесь, получим обобщенную формулу для среднего

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{k} \left[\frac{1}{a} + \sum_{i=1}^{k-2} \frac{k}{(k-i)a + ib} + \frac{1}{b} \right].$$

При $k \rightarrow \infty$, т.е. переходя от дискретного распределения величины x к непрерывному, получим эквивалентный диаметр интервала

(a, b) $\frac{1}{z} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \left[\frac{1}{a} + \sum \frac{k}{(k-i)a + ib} + \frac{1}{b} \right] = \frac{\ln b/a}{b-a}$. Следовательно, средний

диаметр смеси частиц в интервале (a, b) получен в виде

$$z = \frac{b-a}{\ln b/a}. \quad (6)$$

Формула проста и удобна для расчетов, поэтому представляет интерес оценить ее точность. Результаты сравнения показывают, что она дает несколько завышенные значения средних диаметров по сравнению с их точными значениями по формуле (4). Однако, относительные погрешности от применения этой формулы более, чем в два раза ниже по сравнению с z , рассчитанным как среднее арифметическое.

Для восстановления функции распределения частиц по размерам, если средний диаметр в интервале задан в виде (6), обратимся к формуле (1). Отсюда, с учетом сохранения выхода γ класса (a, b) , получим для функции $\phi(x)$

$$\phi = \phi_1(x) = \frac{\gamma}{\ln b/a} \frac{1}{x}. \quad (7)$$

Если же принимать средний размер частиц в интервале (a, b) равным $z = (a + b) / 2$, то это равносильно условию равномерного распределения в этом интервале в виде $\phi = \phi_0(x) = \gamma / (b - a)$.

Естественным обобщением для приближений функции $\phi(x)$ на отрезке (a, b) является рассмотрение ее в виде $\phi = \phi_\theta(x) = C \cdot x^{-\theta}$. Из условия сохранения выхода γ , получим $\phi_\theta(x) = \frac{\gamma(\theta - 1)a^{\theta-1}b^{\theta-1}}{b^{\theta-1} - a^{\theta-1}} x^{-\theta}$.

Находя z из формулы $z_\theta = \frac{1}{\gamma} \int_a^b x \phi_\theta(x) dx$, получим

$$z_\theta = \frac{(\theta - 1)ab(b^{\theta-2} - a^{\theta-2})}{(\theta - 2)(b^{\theta-1} - a^{\theta-1})} \quad (8)$$

или, что, то же самое, заменяя $t = b/a$, $z_\theta = \frac{\theta - 1}{\theta - 2} a \frac{t^{\theta-2} - 1}{t^{\theta-1} - 1}$.

Последние три формулы определения z верны при $\theta \neq 1$ и $\theta \neq 2$. Для $\theta = 2$ $\phi_2(x) = \frac{ab}{b - a} x^{-2}$, и, соответственно $z_2(x) = \frac{ax}{x - a} \ln \frac{x}{a}$.

Рассмотрим поведение функции $\phi(x)$ на отрезке (a, b) . На концах этого отрезка функция принимает значения $\phi(a) = \frac{v\alpha^{1-1/v}}{\Gamma(1-1/v)} a^{v-2} e^{-\alpha a^v}$ и $\phi(b) = \frac{v\alpha^{1-1/v}}{\Gamma(1-1/v)} b^{v-2} e^{-\alpha b^v}$.

Функция $\phi_\theta(x)$ – принимает значение $C_a^{-\theta}$ и $C_b^{-\theta}$. Если потребовать одинакового прироста этих функций на отрезке (a, b) , то, приравняв отношение функций на концах интервала (a, b) , получим $(b/a)^{2-v} \exp\{\alpha b^v - \alpha a^v\} = (b/a)^\theta$. Отсюда

$$\theta = 2 - v + \alpha \frac{b^v - a^v}{\ln b/a}. \quad (9)$$

Равенство (9) решает задачу о наилучшем приближении на отрезке плотности распределения $\phi(x)$ степенными функциями. Степень θ находится в зависимости от границ интервала (a, b) и параметров α и v .

Эксперименты показали, что среднее значение для шламов $\theta = 2$, $z_2 = ab/z_1$. Для $\theta = 3$ $z_3 = \frac{2a^2}{a+b}$, но использование более высоких степеней нецелесообразно.

Для рядовых углей наилучшая степень $\theta = 1,5$. При этом $\phi_{1,5}(x) = \frac{0,5\sqrt{ab}}{\sqrt{b}-\sqrt{a}} x^{-1,5} = \frac{0,5\sqrt{at}}{\sqrt{t}-1} x^{-1,5}$. Эквивалентный диаметр из формулы (8) равен среднему геометрическому

$$Z = \sqrt{ab}. \quad (10)$$

Для сравнения можно привести значения Z , рассчитанные по формуле (10) и осредненные по всем опытам

Таблица

Класс, мм	0,5-1	1-3	3-6	6-13	13-25	25- 50	50-100
Зист	0,709	1,76	4,25	8,69	17,55	32,8	57
Z1.5	0,708	1,73	4,25	8,85	18	35,4	70

Таким образом, для шламов наилучшее приближение дает плотность распределения $\phi(x) = \frac{ab}{b-a} \cdot \frac{1}{x^2}$. Эквивалентный диаметр

$$z(x) \text{ класса } (a, x) \subseteq (a, b) \text{ равен } z(x) = \frac{ax}{x-a} \ln \frac{x}{a}.$$

Если обозначить t – модуль класса (a, b) , то эквивалентный диаметр для этого класса удобно находить по формуле $z = a \frac{t \ln t}{t-1}$.

Коэффициент $a = 1,3862$, при $t = 2$; $a = 1,182$, если $t = \sqrt{2}$ и $a = 1,6479$, если $t = 3$.

Для рядовых углей плотность $\phi(x)$, которая дает наилучшее приближение на отрезке (a, b) , равна $\phi(x) = \frac{0,5\sqrt{at}}{\sqrt{t}-1} x^{-1,5}$, эквивалентный диаметр класса (a, x) равен $z(x) = \sqrt{ax} = a\sqrt{t}$.

Выводы

Предложенный метод расчета среднего размера класса частиц по крупности, основанный на физических принципах, позволяет решать задачи измельчения и обогащения с требуемой точностью. Получение формул для эквивалентных диаметров частиц класса при моделировании процессов позволяет одновременно определить закон распределения в этом классе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилов П.И. Моделирование замкнутых циклов измельчения на основе гипотезы Риттенгера / П.И. Пилов, Н.С. Прядко // Обогащения корисних копалин.- НГУ– Дн-ск. – 2012.– №51 (92). - С. 98 – 107.
2. Пожидаев В.Ф. Прикладные задачи математической статистики. – Луганск: Издательство ВУГУ, 1998. – 153с.

В.Є. Бахрушин, І.О. Дудко

УТОЧНЕННЯ МОДЕЛЕЙ НОРМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НА ОСНОВІ МІНІМІЗАЦІЇ КРИТЕРІЮ КОЛМОГОРОВА- СМИРНОВА

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос об оценивании критических значений критерия согласия Колмогорова-Смирнова для случая, когда параметры модели нормального распределения рассчитываются путем минимизации расчетного значения этого критерия.

Вступ. Традиційна процедура ідентифікації моделей розподілу складається з трьох етапів [1, 2]: формування гіпотези про ймовірнісний закон розподілу; оцінювання параметрів обраної моделі; перевірка адекватності моделі за допомогою статистичних критеріїв. Останній етап у [3] рекомендовано виконувати з використанням критеріїв типу омега-квадрат та Колмогорова-Смирнова. Втім існує проблема вибору методів оцінювання параметрів моделі. Зазвичай при використанні моделей нормального розподілу для цього беруть вибіркові середнє арифметичне та стандартне відхилення. У [2] показано, що модель може бути істотно покращена, якщо здійснити мінімізацію розрахункового значення критерію Колмогорова-Смирнова, використовуючи ці параметри як початкове наближення. Але при цьому постає питання про те, з якими критичними значеннями слід порівнювати отриману величину для того, щоб прийняти або відхилити нульову гіпотезу про відповідність даних отриманій моделі. Можна очкувати, що критичне значення залежатиме у цьому випадку від вибору конкретного методу мінімізації, а також від того, яку саме гіпотезу перевіряють – про відповідність даних нормальному розподілу (незалежно від параметрів моделі), чи про їх відповідність моделі з визначеними на попередньому етапі параметрами.

Одним з шляхів вирішення цієї проблеми може бути встановлення статистичного зв'язку між розрахунковими значеннями, одержуваними при традиційній методиці ідентифікації, та значеннями,

які є результатами мінімізації критерію Колмогорова-Смирнова для тих самих вибірок.

Постановка завдань. Метою роботи було визначення характеристик статистичного зв'язку між розрахунковими значеннями критерію Колмогорова-Смирнова, одержуваних при використанні різних методик ідентифікації моделі розподілу. Для цього було взято дві серії вибірок, одна з яких була згенерована за допомогою генератора випадкових чисел, а друга – являла собою реальні емпіричні дані. Потім досліджено кореляцію між розрахунковими значеннями критерію, отриманих за різними методиками для обох серій вибірок, й побудовано відповідні регресійні моделі.

Критерій згоди Колмогорова-Смирнова. На практиці постає питання, чи погоджуються результати спостережень з функцією розподілу сімейства $\{F(x; \Theta), \theta \in \Theta\}$ при визначеному $\theta = \theta_0$. Відповідні гіпотези називають гіпотезами згоди, а методи їх перевірки – критеріями згоди [3]. Умови застосування непараметричних критеріїв згоди при перевірці простих і складних гіпотез про вигляд функції розподілу зустрічається в роботах [1–6].

Одним з найбільш популярних непараметричних критеріїв згоди є критерій Колмогорова-Смирнова, розроблений А.М. Колмогоровим та М.В. Смирновим в 1930-х роках. Його сутність полягає у визначенні максимального за модулем відхилення моделі розподілу від наявних емпіричних точок та його порівнянні з критичним значенням [1, 7]. Нехай $F_n(x)$ – емпірична функція розподілу випадкової величини x , що подана у вигляді вибірки $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$:

$$F_n(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1; \\ \frac{i}{n}, & x_i \leq x \leq x_{i+1}, 1 \leq i \leq n-1; \\ 1, & x \geq x_n. \end{cases}$$

Далі, залежно від наявної інформації про функцію розподілу, вирізняють два шляхи.

1) Якщо відомі значення параметрів $\theta = \theta_0$ і функція розподілу $F(x; \Theta)$ неперервна, то для перевірки двосторонньої нульової гіпотези

$H_0 : F_n(x) = F(x)$, розраховують максимальну відстань між емпіричною і теоретичною функціями розподілу:

$$D_n = \sup_{|x| < \infty} |F_n(x) - F(x, \theta_0)|,$$

$$D_n^+ = \sup_{|x| < \infty} (F_n(x) - F(x, \theta_0)),$$

$$D_n^- = -\inf_{|x| < \infty} (F_n(x) - F(x, \theta_0)).$$

На практиці для цього використовують формули:

$$D_n^+ = \max_{1 \leq i \leq n} \left(\frac{i}{n} - F(x_i, \theta_0) \right),$$

$$D_n^- = \max_{1 \leq i \leq n} \left(F(x_i, \theta_0) - \frac{i-1}{n} \right),$$

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} (D_n^+, D_n^-).$$

У випадку односторонньої нульової гіпотези беруть $D_n = D_n^+$.

Емпіричне значення критерію Колмогорова-Смирнова визначають за формулою $\lambda = \sqrt{n}D_n$ та порівнюють з критичним значенням для заданого рівня значущості.

2) Якщо теоретичне значення параметра θ_0 невідоме, то використовують статистику

$$\lambda^* = \sqrt{n}D_n(\theta^*),$$

де на відміну від істинних значень параметрів θ_0 використовують вектор їх вибірових оцінок θ^* . Визначення величини $D_n(\theta^*)$ здійснюють так саме, як і у першому випадку.

Нульову гіпотезу про відповідність вибірки заданій моделі розподілу приймають, якщо розрахункове значення критерію є меншим, ніж критичне для заданого рівня значущості. В іншому випадку цю гіпотезу відхиляють.

Критичні значення статистики Колмогорова-Смирнова, визначають залежно від способу визначення параметрів моделі (табл. 1) [3].

Критичні значення статистики Колмогорова-Смирнова

Довірчий рівень, p	0,85	0,90	0,95	0,975	0,99
Критичне значення для D_n	1,138	1,224	1,358	1,480	1,626
Критичне значення для $D_n(\theta^*)$	0,775	0,819	0,895	0,955	1,035

Зважаючи на те, що критичні значення критерію Колмогорова-Смирнова не залежать від типу невідомого розподілу, а також те, що як відстань між $F_n(x)$ та $F(x)$ беруть максимальне відхилення, можна використовувати процедуру перевірки гіпотези згоди при пошуку довірчих меж неперервної функції розподілу [4]. Незалежно від обраної моделі (теоретичної функції) розподілу:

$$P\{F_n(x) - d_\alpha \leq F(x) \leq F_n(x) + d_\alpha\} = 1 - \alpha, \text{ для всіх } x, \quad (1)$$

де d_α – критичне значення D_n для рівня значущості α .

Формула (1) означає, що теоретична функція $F(x)$ цілком знаходиться всередині інтервалу $\pm d_\alpha$, утвореного навколо обраної точки $F_n(x)$.

Можна отримати оцінки обсягу вибірки, потрібного для апроксимації функції розподілу з необхідною точністю. При $\alpha \leq 0,2$ та $n \geq 80$:

$$d_\alpha \approx \sqrt{-\frac{1}{2} \ln \frac{\alpha}{2}} / \sqrt{n}.$$

При збільшенні обсягу вибірки n , розподіл статистик D_n^+ , D_n^- , D_n наближується до граничних. Для невеликих обсягів вибірок різниця між граничним і вибіркоvim розподілом може бути суттєвою. Вирішення цієї проблеми полягає у використанні нових статистик $\tilde{D}_n^+$, $\tilde{D}_n^-$, $\tilde{D}_n$, розподіли яких краще узгоджуються з граничними за малих n . Формули для розрахунку цих статистик представлені в таблиці 2 [4].

Формули модифікованих статистик

Вихідна статистика	Модифікована статистика
	Верхній хвіст розподілу
$\sqrt{n}D_n^+$	$\tilde{D}_n^+ = D_n^+ \left(\sqrt{n} + 0,12 + 0,11/\sqrt{n} \right)$
$\sqrt{n}D_n^-$	$\tilde{D}_n^- = D_n^- \left(\sqrt{n} + 0,12 + 0,11/\sqrt{n} \right)$
$\sqrt{n}D_n$	$\tilde{D}_n = D_n \left(\sqrt{n} + 0,12 + 0,11/\sqrt{n} \right)$
	Нижній хвіст розподілу
$\sqrt{n}D_n$	$\tilde{D}_n = D_n \left(\sqrt{n} + 0,275 + 0,04\sqrt{n} \right)$

Однією з властивостей критерію Колмогорова-Смирнова є його стійкість проти будь-якої альтернативної гіпотези, тобто будь-яка відмінність розподілу вибірки від теоретичного закону буде виявлена, за умови великої кількості спостережень.

Процедура мінімізації розрахункових значень. При ідентифікації моделей розподілу важливим завданням є підбір такої моделі з заданого класу, яка б найкраще відповідала наявним емпіричним даним. Для вирішення цієї проблеми одним з авторів в роботах [1, 2] було запропоновано використовувати процедуру мінімізації розрахункових значень статистичних критеріїв із застосуванням параметрів моделі як змінних, які можна варіювати під час цієї процедури. При цьому як початкове наближення використовуються вибіркові оцінки параметрів, зокрема для моделі нормального розподілу – вибіркові середнє арифметичне й стандартне відхилення. При використанні критерію Колмогорова-Смирнова, це означає, що необхідно підібрати такі параметри розподілу, щоб значення λ^* було найменшим.

Реалізацію запропонованої процедури можна здійснювати за допомогою будь-яких програмних засобів, де реалізовано сучасні алгоритми багатовимірної нелінійної оптимізації. Зокрема при застосуванні табличного процесора Microsoft Excel для цього можна використовувати надбудову «Пошук розв'язку» [8]. У цьому випадку як цільову необхідно взяти ту комірку, в якій міститься значення λ^* , вибрати пошук мінімального значення та змінювати комірки, що містять

значення параметрів моделі. Діалогове вікно цієї процедури зображено на рисунку 1.

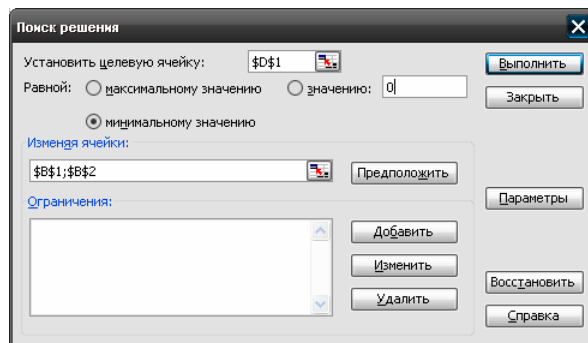


Рисунок 1 - Діалогове вікно «Пошук розв'язку»

Також є можливість встановити додаткові параметри пошуку розв'язку в діалоговому вікні, що викликається кнопкою «параметри».

Процедура мінімізації дає змогу суттєво знизити розрахункові значення критерію, тобто покращити одержану модель, але постає проблема того, які критичні значення слід використовувати для прийняття чи відхилення гіпотези про її відповідність розподілу наявним емпіричним даним.

Результати дослідження. Було досліджено дві серії вибірок. Перша серія являла собою 60 вибірок обсягом по 1000 елементів кожна, отриманих за допомогою вбудованого генератора випадкових чисел MS Excel за нормальним розподілом із середнім значенням $\bar{x} = 0$ та стандартними відхиленнями σ від 1 до 10. Після цього для кожної вибірки визначали вибіркові середнє арифметичне й стандартне відхилення та розраховували значення критерію Колмогорова-Смирнова λ^* . Далі виконували описану вище процедуру мінімізації розрахункового значення й одержували його нове значення $\lambda_{\text{опт.}}^*$.

Як приклад, наведемо результати, отримані для однієї з вибірок, згенерованої за нормальним законом розподілу з параметрами $n = 1000$, $\bar{x}_0 = 0$, $\sigma = 4$. Відповідні вибіркові значення дорівнювали: $\bar{x} = 0,115$, $s = 3,915$, $x_{\min} = -13,339$, $x_{\max} = 12,353$, а результати розрахунку критерію Колмогорова-Смирнова були такими: $D_n = 0,038$, $\lambda = 1,204$, $D_n^* = 0,024$, $\lambda^* = 0,760$.

Після застосування процедури «Пошук розв'язку» знайдено нові значення: $\bar{x} = 0,125$, $s = 3,801$, $D_n^* = 0,017$, $\lambda_{\text{опт.}}^* = 0,548$. Отримане $\lambda_{\text{опт.}}^*$ є значно меншим ніж λ^* .

Далі розглянемо результати по всім вибіркам. На рис. 2. показано зв'язок між λ^* та $\lambda_{\text{опт.}}^*$ для вибірок, що були згенеровані в MS Excel.

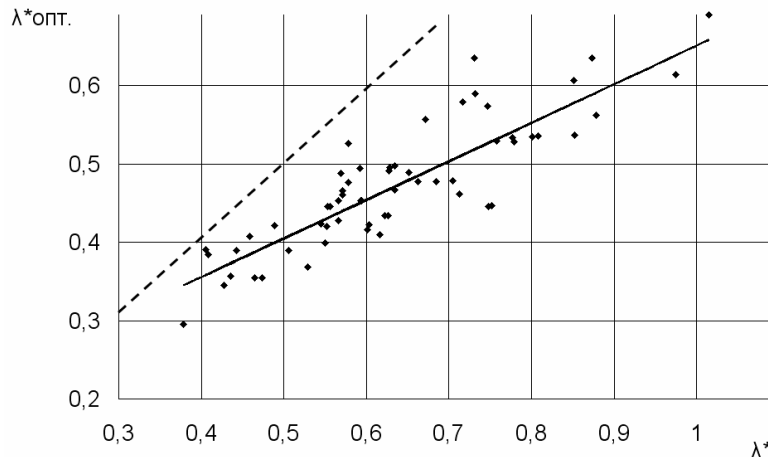


Рисунок2 - Зв'язок між λ^* та $\lambda_{\text{опт.}}^*$ для вибірок, згенерованих в MS Excel

Коефіцієнт кореляції Пірсона між λ^* та $\lambda_{\text{опт.}}^*$ дорівнює 0,86, що свідчить про наявність сильного лінійного зв'язку між досліджуваними змінними. При перевірці значущості коефіцієнта кореляції r для $\alpha = 0,05$ та кількості степенів вільності $k = 58$, отримали розрахункове значення t – критерію Стюдента $t = 13,01$, критичне значення $t_{0,95;58} = 2,00$. З $t > t_{0,95;58}$ випливає, що коефіцієнт кореляції між λ^* та $\lambda_{\text{опт.}}^*$ значимо відрізняється від нуля. Значення коефіцієнта кореляції ρ з надійністю 0,95 міститься в інтервалі $0,780 \leq \rho \leq 0,916$. Рівняння регресії має вигляд: $\lambda_{\text{опт.}\lambda^*}^* = 0,492\lambda^* + 0,159$.

Друга серія вибірок являла собою дані про показники складності та коефіцієнти дискримінації тестових завдань ЗНО 2009 – 2011, а також підсумкові й окремі показники низки міжнародних університетських рейтингів. Загалом ця серія містила 118 вибірок обсягом від 32 до 400 елементів. Процедура аналізу була такою самою, як і у попередньому випадку.

На рис. 3. показано зв'язок між λ^* та $\lambda_{\text{опт.}}^*$ для цієї серії.

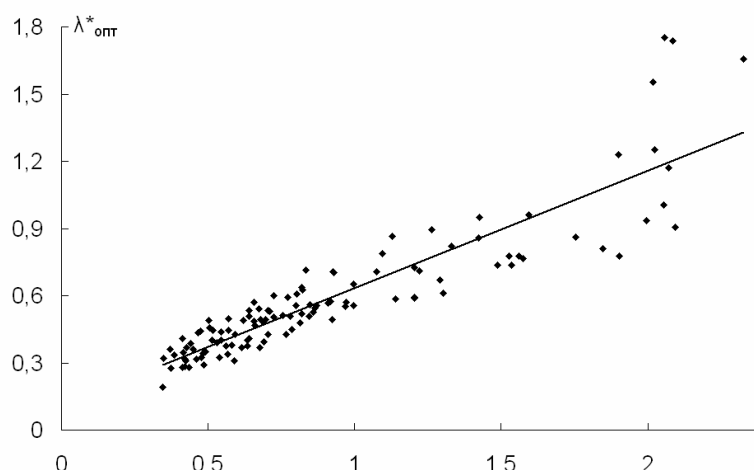


Рисунок 3 - Зв'язок між λ^* та $\lambda_{\text{опт.}}^*$ для серії вибірок, що містять освітні показники

Коефіцієнт кореляції Пірсона між λ^* та $\lambda_{\text{опт.}}^*$ у цьому випадку є трохи вищим і дорівнює 0,90, що також відповідає гіпотезі про наявність сильного лінійного зв'язку між досліджуваними показниками. При перевірці значущості коефіцієнта кореляції r для $\alpha = 0,05$ та кількості степенів вільності $k = 116$, отримали розрахункове значення t -критерію Стюдента $t = 13,01$, критичне значення $t_{0,95; 58} = 2,00$. З $t > t_{0,95; 58}$, як і у попередньому випадку, впливає, що коефіцієнт кореляції між λ^* та $\lambda_{\text{опт.}}^*$ значимо відрізняється від нуля. Значення коефіцієнта кореляції r з надійністю 0,95 міститься в інтервалі $0,780 \leq r \leq 0,916$. Рівняння регресії має вигляд: $\lambda_{\text{опт.}, \lambda^*}^* = 0,525\lambda^* + 0,109$. При цьому довірчі рівні коефіцієнтів моделі при рівні значущості 0,05 істотно перетинаються. Для коефіцієнта при λ^* для першої моделі маємо довірчий інтервал $a \in [0,416; 0,568]$, а для другої – $a \in [0,477; 0,572]$. Відповідно, значення вільного члена для першої моделі перебуває в діапазоні $b \in [0,109; 0,208]$, а для другої – $a \in [0,059; 0,157]$.

Отримані залежності дають змогу приблизно встановити критичні значення критерію Колмогорова-Смирнова у випадку, коли для більш точного визначення параметрів моделі нормального розподілу

використовується мінімізація розрахункового значення цього критерію. Так, рівню значущості 0,05 у цьому випадку буде відповідати критичне значення приблизно 0,57 – 0,6, а рівню значущості 0,1 – критичне значення 0,53 – 0,56.

Висновки. Показано можливість оцінювання критичних значень критерію Колмогорова-Смирнова у випадку, коли значення параметрів моделі нормального розподілу уточнюються шляхом мінімізації розрахункового значення цього критерію. Отримано статистичну модель зв'язку між цими значеннями й відповідними розрахунковими значеннями, визначеними для випадку, коли використовують вибіркові оцінки цих параметрів. У подальшому планується уточнити параметри зв'язку на вибірках великого обсягу, а також перевірити аналогічні зв'язки при інших моделях розподілу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бахрушин В.Є. Методи аналізу даних / В.Є. Бахрушин – Запоріжжя: КПУ, 2011. – 268 с.
2. Бахрушин В.Е. Проблемы идентификации моделей распределения случайных величин с применением современного программного обеспечения / В.Є. Бахрушин // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 11. – С. 50 – 54.
3. Орлов А.И. Прикладная статистика. Учебник / А.И. Орлов. – М.: Издательство «Экзамен», 2004. – 656 с.
4. Айвазян А.С. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
5. Лемешко Б.Ю. О задаче идентификации закона распределения случайной составляющей погрешности измерений / Б.Ю. Лемешко // Метрология. – 2004. – № 7. – С. 8 – 18.
6. Лемешко Б.Ю. О правилах проверки согласия опытного распределения с теоретическим / Б.Ю. Лемешко, С.Н. Постовалов // Методы менеджмента качества. Надежность и контроль качества. – 1999. – № 11. – С. 34 – 43.
7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных сотрудников / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
8. Лялин В.С. Статистика: теория и практика в Excel: учеб. пособие / В.С. Лялин, И.Г. Зверева, Н.Г. Никифорова. – М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2012. – 448 с.: ил.

Ю.П. Кондратенко, О.В. Коробко

**СПЕЦІАЛІЗОВАНА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА
АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ
ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Анотація. В статті здійснено аналіз існуючих систем контролю параметрів та ефективності термоакустичних процесів. В якості критерію ефективності обрано коефіцієнт корисної дії. Запропоновано структурні та програмно-апаратні засоби реалізації спеціалізованої комп'ютерної системи (СКС) для моніторингу та аналізу термоакустичних процесів (ТАП). Наведено результати роботи системи при дослідженні енергетичних показників термоакустичних процесів на прикладі термоакустичного двигуна (ТАД).

Ключові слова: спеціалізована комп'ютерна система, контроль, ефективність, енергетичні показники, термоакустичні процеси.

Вступ. Термоакустичні установки [1] є новітнім видом енергетичних систем, робочий процес яких базується на взаємоперетвореннях акустичної та теплової енергій. Головною особливістю термоакустичних систем є те, що на відміну від інших теплових машин, носієм механічної енергії, яку виробляють термоакустичні апарати (ТАА), і водночас «виконавчим механізмом» термодинамічного циклу, є потужні акустичні пульсації [2] робочого тіла (газу). Саме тому цим тепловим машинам присутня висока чутливість до властивостей робочого тіла (в'язкості, щільності, теплопровідності), а також до впливів зовнішнього середовища (температури, тиску тощо). Ефективна робота ТАА можлива тільки за умов підтримки (стабілізації) усталених значень внутрішніх параметрів різної природи: акустичних, гідродинамічних, теплофізичних, а тому доцільною є розробка та впровадження системи автоматичного контролю ефективності роботи ТАА.

Постановка задачі. Основним параметром, що характеризує ефективність роботи будь-яких систем є коефіцієнт корисної дії (ККД). Термоакустичні комплекси [3,4] представляють собою багато-

ступеневі системи, в яких підведена енергія P_{supl} (електрична, механічна або теплова) витрачається на генерацію акустичної хвилі (sound) P_{ak} , що в свою чергу виконує корисну роботу, створюючи температурний градієнт $T_H - T_C$ (рис. 1), який використовується в зовнішніх системах P_{out} .

При аналізі ефективності ТАА особливе значення має саме оцінювання ККД підсистеми генерації акустичної хвилі, адже саме від цієї складової залежить кількість корисної енергії, що може бути використана для роботи ТАП.

За видом підведеної енергії [5] P_{supl} термоакустичні системи можна розділити на три основних групи:

- електроакустичні (рис. 1,а): в якості джерел акустичних хвиль використовуються електричні генератори

$$P_{supl}(t) = P_{el}(t) = u(t)i(t), \quad (1)$$

де $u(t)$ – підведена напруга; $i(t)$ – підведений струм;

- термоакустичні (рис. 1,б): в даних системах використовується комбінована пара термоакустичних установок, одна з яких виступає в ролі генератора акустичних хвиль, а інша – в ролі навантаження

$$P_{supl}(t) = P_Q(t) = GC(T_{in} - T_{out}), \quad (2)$$

де G – питома витрата теплоносія; питома теплоємність теплоносія; T_{in}, T_{out} – вхідна та вихідна температури теплообмінної поверхні;

- механоакустичні (рис. 1,в): джерелом акустичних хвиль є пульсації, що генеруються зовнішніми пристроями (компресори, двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) тощо)

$$P_{supl}(t) = P_m(t) = p(t)U(t), \quad (3)$$

де $p(t)$ – тиск, спричинений пульсаціями; $U(t)$ – об'ємна швидкість.

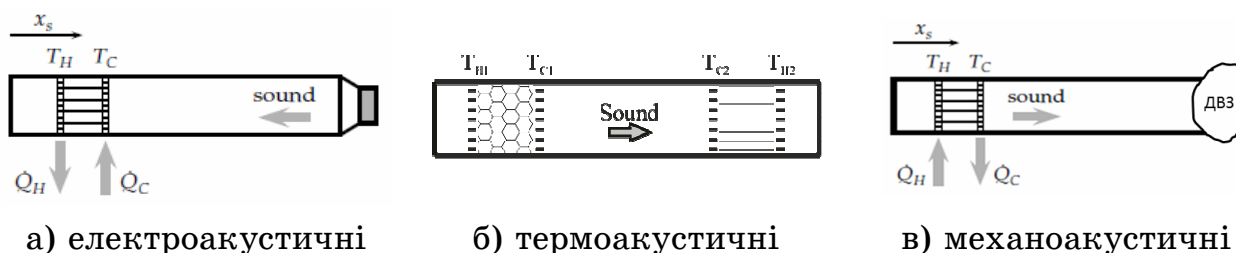


Рисунок 1 - Типи термоакустичних систем за видом підведеної енергії

Енергію акустичної хвилі в резонаторі ТАА можна оцінити за допомогою виразу [6,7]

$$P_{ak} = SI = Sp(t)v(t), \quad (4)$$

де S – площа поперечного перерізу резонатора; I – інтенсивність звукової хвилі; $p(t), v(t)$ – акустичний тиск та коливальна швидкість акустичної хвилі.

Базуючись на рівняннях (1)-(4) ККД первинного контуру термоакустичної установки можна підрахувати як

$$\eta_{a/s} = P_{ak}/P_{supl}. \quad (5)$$

Основні з опублікованих результатів досліджень в сфері систем автоматизованого моніторингу та аналізу ТАП отримано на основі використання електроакустичних систем.

Зокрема, в роботах [8,9] наведено структуру та алгоритми роботи комп'ютеризованих систем аналізу енергетичних та акустичних показників термоакустичних рефрижераторів (ТАР) з електромеханічним гучномовцем. Методика оцінки акустичної потужності в даних системах базується на вимірюванні тиску $p(t)$ за допомогою датчиків тиску та оцінки коливальної швидкості $v(t)$ в резонаторі ТАР за вимірюваннями прискорення $a(t)$ мембрани гучномовця із використанням акселерометру. Це звужує сферу використання подібних комп'ютеризованих систем лише для автоматизації електроакустичних установок.

Традиційним способом визначення параметрів звукової хвилі в термоакустичних та механоакустичних системах є прямий метод [10] одночасного вимірювання $p(t)$ і $v(t)$ за допомогою датчику тиску і лазерного доплерівського вимірювача швидкості [6,7]. Даний підхід дозволяє визначати значення акустичного тиску і коливальної швидкості з високою точністю, проте потребує коштовного обладнання та наявності прозорої ланки (зони) резонатору для проходження лазерних променів. Дані недоліки обмежують можливості застосування прямого методу лише в дослідних установках та роблять недоцільним його впровадження при реалізації автоматизованих та автоматичних систем контролю ТАА.

Запропонована авторами спеціалізована комп'ютерна система для аналізу енергетичних параметрів реалізує метод двох датчиків [4,7,11] тиску для оцінювання параметрів акустичної хвилі в резона-

торі ТАА. Даний підхід дозволяє оминути недоліки та обмеження зазначених вище підходів та створити універсальну систему автоматичного контролю ефективності термоакустичних процесів.

Метою даної статті є структурно-програмна реалізація спеціалізованої комп'ютерної системи автоматичного контролю параметрів термоакустичних процесів та аналіз результатів її експериментальних випробувань при оцінюванні енергетичних параметрів термоакустичного двигуна.

Структура та основні компоненти СКС. На рис. 2 наведена структура та основні компоненти спеціалізованої комп'ютерної системи [12] для визначення енергетичних параметрів термоакустичних апаратів.

Головними елементами системи є персональний комп'ютер (ПК), датчики тиску ДД ($p_1, p_2, \dots, p_n$), температури ДТ ($T_1, T_2, \dots, T_n$) та витрат ДВ ($G_1, \dots, G_n$), програмований логічний контролер (ПЛК) для збору температурних показників та значень витрат, а також мікроконтролер (МК) STM32F4, що служить для збору швидкоплинних показників з датчиків тиску ДД системи та їх передачі до ПК.

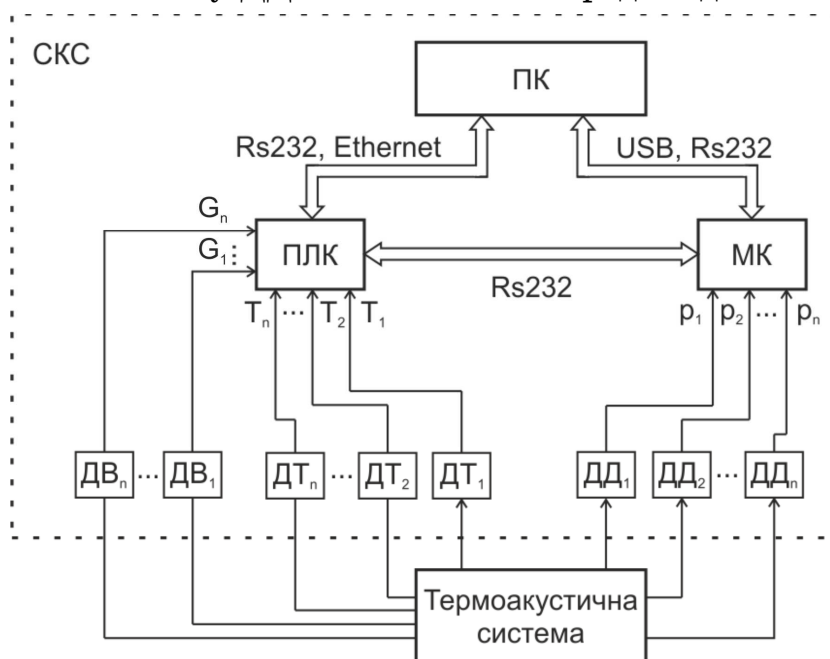


Рисунок 2 - Структура спеціалізованої комп'ютерної системи для контролю параметрів термоакустичних процесів

Мікроконтролери STM32F4 мають три аналогово-цифрових перетворювача, які характеризуються 12-бітною роздільною здатністю і частотою перетворення до 2,4 млн. перетворень в секунду кожен, що

забезпечує високу швидкодію та можливість застосування запропонованої комп'ютерної системи в будь-яких термоакустичних установках, адже діапазон робочих частот ТАА не перевищує десятків кГц.

ПЛК виконує збір даних, щодо поточного стану ТАА з периферійного обладнання та їх пересилку до ПК по мережі Ethernet.

Для забезпечення максимальної гнучкості розроблена система дозволяє здійснювати комунікацію між всіма компонентами за допомогою RS232, а також для забезпечення можливості пересилки великих обсягів даних в ПЛК реалізована підтримка Ethernet, а МК може обмінюватися даними з ПК через USB.

Розроблене для ПК програмне забезпечення [12] дозволяє зберігати отриману з контролера інформацію в архівну базу даних, здійснювати необхідні алгоритми цифрової обробки вимірних сигналів [13], а також виводити всю наявну інформацію на екран користувача.

Таким чином запропонована структура комп'ютерної системи дозволяє проводити реєстрацію та поточний моніторинг параметрів термоакустичних установок [14].

Експериментальні дослідження ефективності роботи ТАД. Випробування запропонованої авторами СКС проводилися з використанням дослідного зразка термоакустичного двигуна [1,3], з резонатором довжиною 1010 мм та діаметром 46 мм, що заповнено повітрям при атмосферному тиску.

Даний пристрій переробляє теплову потужність P_Q в акустичну P_{ak} , тому його ККД (5) можна оцінити як відношення створеної акустичної потужності до підведеної теплової. В якості джерела теплової енергії в дослідній установці (рис. 3) використовується ніхромовий нагрівач, а отже підведену потужність можна обчислювати на основі споживаної нагрівачем електричної енергії P_{el} (1), що надходить від блока живлення (БЖ) і вимірюється за допомогою датчика струму (ДС) ACS712ELCTR-05B-T та дільника напруги (ДН). Тоді ККД ТАД можна обчислити як

$$\eta_{ТАД} = \frac{P_{ak}}{P_{el}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Для підрахунку акустичної потужності P_{ak} використовується інформація з двох датчиків тиску MPXV7007DP (ДД1, ДД2 на рис. 3), які рознесено на відстань $\Delta x = 160$ мм. Відстань від краю двигуна

до першого датчика тиску дорівнює 745 мм, а до другого – 905 мм. Контроль температурних показників системи здійснювався із використанням термопар T_H , T_C .

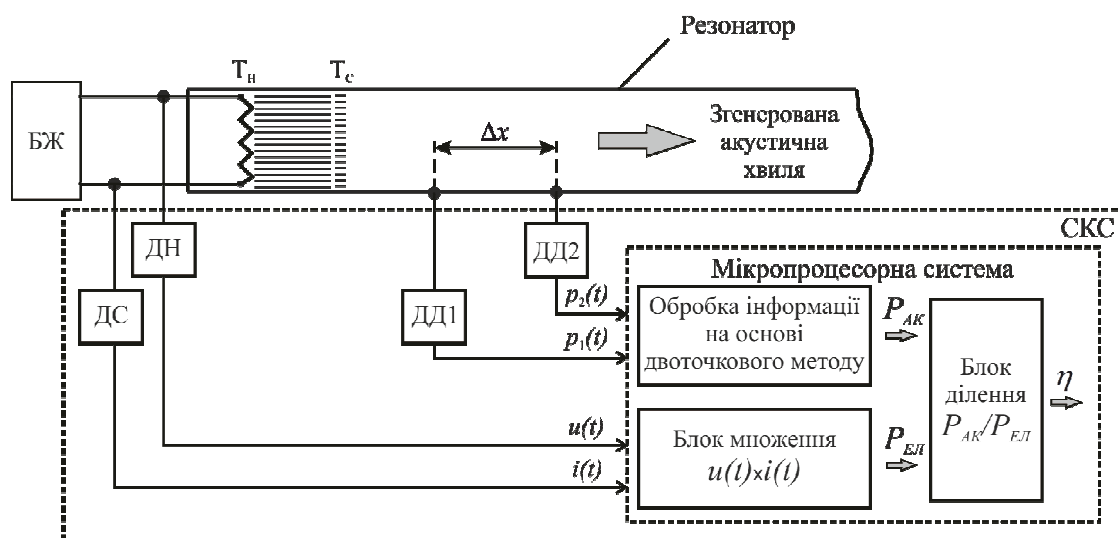
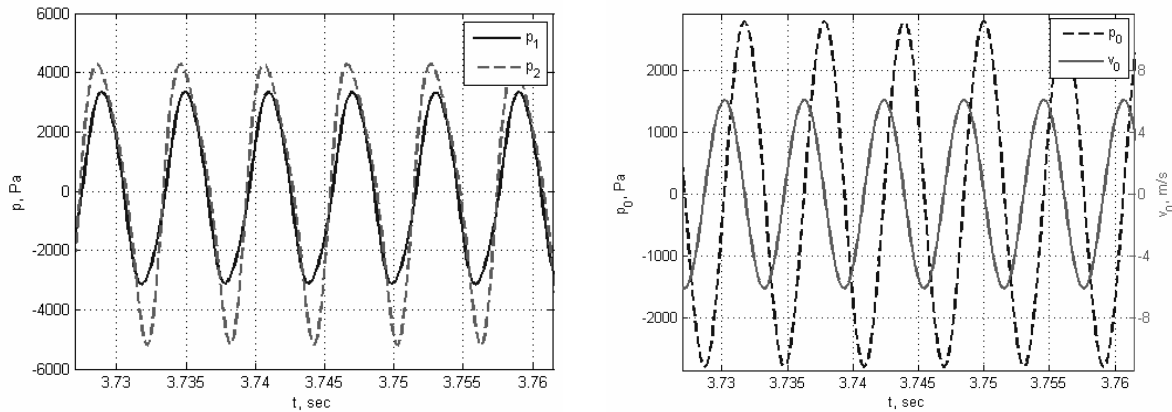


Рисунок 3 - Схема СКС для контролю ефективності ТАД

На рис. 4 наведено результати експериментальних випробувань дослідного ТАД за допомогою методу двох датчиків [11]. На рис. 4,а представлені показники двох датчиків тиску, а на рис. 4,б – розраховані за допомогою даного методу параметри акустичної хвилі. Слід зазначити, що метод двох датчиків дозволяє провести розрахунок тиску $p_0(t)$ та коливальної швидкості $v_0(t)$ в точці, що знаходиться посередині ($\Delta x/2$) між точками виміру тиску (ДД1 та ДД2 на рис. 3). Слід зазначити, що розраховані за методом двох датчиків значення коливальної швидкості $v_0(t)$ та акустичної потужності P_{ak} співпадають з даними, отриманими прямим шляхом з використанням термоанометру DISA.

В табл. 1 представлено підсумкові результати тестування ТАД при різних значеннях підведеної потужності P_{el} . З наведених результатів можна зробити висновок, що дослідний ТАД має мінімально необхідну величину підведеної потужності (пускову потужність) $P_{el}(t) \approx 53$ Вт, а найбільший ККД $\eta = 8.53\%$ досягається при підведеній потужності $P_{el}(t) \approx 165$ Вт.



а) акустичний тиск

б) розраховані тиск та швидкість

Рисунок 4 - Експериментальні дослідження ефективності роботи ТАД

Слід зазначити, що отримані значення ККД є типовими для даного типу установок [15] за наявних параметрів. Подальшого підвищення ефективності ТАП можна досягти структурними змінами двигуна, підвищенням робочого тиску в резонаторі та заміною робочого тіла ТАД з повітря на гелій.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень ТАД
засобами запропонованої СКС

№	I, А	U, В	P_{el} , Вт	p_0 , Па	v_0 , м/с	P_{ak} , Вт	η , %
1	2,3	23,1	53,13	543	0,85	0,39	0,73
2	3	31,1	93,3	1768	3,2	4,8	5,14
3	4	41,5	166	2795	5,93	14,16	8,53
4	5	52,5	262,5	4128	7,27	22,4	8,53

Висновки. Авторами проведено аналіз існуючих систем контролю параметрів та оцінювання ефективності термоакустичних установок на основі енергетичних показників. Показано, що існуючі системи мають ряд недоліків (вузька спрямованість, коштовне обладнання та структурні вимоги), що обмежує можливості їх застосування на реальних об'єктах.

Запропоновані авторами структурні (рис. 2) та програмно-апаратні рішення дозволяють створити спеціалізовані комп'ютерну систему комплексної оцінки показників ефективності термоакустичних апаратів, що позбавлена зазначених недоліків.

Проведені експериментальні дослідження (рис. 3, 4) свідчать про доцільність та ефективність застосування запропонованої комп'ютерної системи в термоакустичних комплексах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rott N. Thermoacoustics // *Adv. Appl. Mech.* – №20 (135). – 1980.
2. Стретт Дж. В. Теория звука. Том. 2 // Государственное издательство технико-теоретической литературы. – М., 1958. – 475 с.
3. Tomonaga T. Fundamental Thermoacoustics // Uchida Rokakuno Publishing, Tokyo. – 1998.
4. Кондратенко Ю.П. Програмно-апаратні засоби для непрямого визначення і контролю параметрів електроакустичних сигналів на основі двоточкового методу / Ю.П. Кондратенко, О.В. Коробко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* – Вип. 6 (58), 2012, сс. 114-118.
5. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. – М.: Высш. шк., 1988. – 479 с.
6. Yazaki T. Measurement of sound generation in thermoacoustic oscillations / Yazaki T., Tominaga A. // *Proc. R. Soc. London.* – 1998. – Ser. A 454. – pp. 2113-2122.
7. Biwa T. Experimental verification of a two-sensor acoustic intensity measurement in lossy ducts / T. Biwa, Y. Tashiro, H. Nomura, Y. Ueda // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2008. – 124 (3). – pp. 1584-1590.
8. Li Y. Adaptive tuning of an electrodynamically driven thermoacoustic cooler / Y. Li, B. L. Minner, G. T.-C. Chiu, L. Mongeau, J. E. Braun // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2002. – 111(3). – pp. 1251-1258.
9. Ryan T. S. Design and control of a standing-wave thermoacoustic refrigerator // University of Pittsburgh, 2006. – 101 p.
10. Bailliet H. Acoustic power flow measurement in a thermoacoustic resonator by means of laser Doppler anemometry (L.D.A.) and microphonic measurement / H. Bailliet, P. Lotton, M. Bruneau, V. Gusev and others // *Applied Acoustics.* – 2000. – 60. – pp. 1-11.
11. Fusco A. M. Two-sensor power measurements in lossy ducts / A. M. Fusco, W. C. Ward, G. W. Swift // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1992. – pp. 2229-2235.
12. Kondratenko Y. Multisensor data acquisition system for thermoacoustic processes analysis / Y. Kondratenko, V. Korobko, O. Korobko // *Proceedings of the 6th IEEE international conference IDAACS'2011, Prague.* – 2011. – №1. – PP. 54-58.
13. Кондратенко Ю.П. Синтез нелінійних математичних моделей системи «генератор коливальних резонаторів ТАА» / Ю.П. Кондратенко, О.В. Коробко // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.* – Випуск 3 (80). – Дніпропетровськ, 2012. – сс. 40-48.
14. Kondratenko Y. Frequency Tuning Algorithm for Loudspeaker Driven Thermoacoustic Refrigerator Optimization / Y. Kondratenko, O. Korobko, O. Kozlov // *Lecture Notes in Business Information Processing.* – Vol. 115, 2012, pp. 270-279.
15. Mehta S.M. Design of standing wave type thermoacoustic prime mover for 300 hz operating frequency / S.M.Mehta, K.P.Desai, H.B.Naik, M.D. Atrey // *Proceedings of the 16th International Cryocooler Conference, USA.* – 2011. – pp. 343-352.

С.В. Клименко, А.О. Лантушенко

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ЦИФРОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУРЕНТНИХ НЕСИСТЕМАТИЧНИХ КОДІВ

Анотація. На основі аналізу можливостей підвищення завадостійкості каналів зв'язку, розроблена інформаційна технологія використання рекурентних несистематичних кодів, яка дозволяє виявляти та виправляти одиночні та двійні помилки.

Ключові слова: завадостійкість, рекурентні несистематичні коди, нерекурсивний фільтр, перешкода в каналі зв'язку, детектор помилок.

Постановка задачі. Із-за наявності перешкод в каналах зв'язку, відбувається переключення цифрових даних, що може привести, особливо в космічних системах зв'язку, до катастрофічних наслідків. Серед методів захисту від помилок найбільшого поширення набуло перешкодостійке кодування, яке дозволяє отримати високі якісні показники роботи систем зв'язку. Його основне призначення – вживання всіх можливих заходів для того, щоб ймовірність переключень інформації була досить малою не дивлячись на присутність перешкод або збоїв в роботі мережі.

Питання підвищення завадостійкості цифрових систем зв'язку є предметом дослідження багатьох вчених, а саме: Бикова М.М. [1], Борисенко О.А. [2], Василенко С.В. [3], Ратайчука І.А. [4], Тоцького А.В. [5], та ін. Але, метод захисту інформації від помилок, що виникають в каналі зв'язку, використовуючи перешкодостійкі рекурентні несистематичні коди, нині є недостатньо висвітленим. Саме тому, тема даної статті є актуальною у зв'язку з тим, що головна особливість застосування рекурентних несистематичних кодів полягає в можливості виявлення і виправлення переключень сигналу, що виникли в процесі його передачі.

Задачі, які розглянуті та вирішені у данній статті: 1) розроблена функціональна схема системи передачі інформації з використанням рекурентних несистематичних кодів; 2) описаний алгоритм робо-

ти системи передачі інформації, використовуючи несистематичне кодування з передавальними функціями фільтрів $H_1(z) = 1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-4}$ і $H_2(z) = 1 + z^{-3} + z^{-4}$; 3) розроблено програмне забезпечення для інформаційної технології завадостійкого цифрового зв'язку; 4) досліджена працездатність інформаційної технології при помилках типу білого дискретного шуму з заданою інтенсивністю перекручень ($p = 0.01$; $p = 0.02$; $p = 0.03$; $p = 0.04$; $p = 0.05$).

Відомо, що при збільшенні кількості виправлених помилок складність апаратури підвищується, а ефект від виправлення помилок несуттєвий, так як вони зустрічаються з маленькими ймовірностями. Тому, у статті були розглянуті тільки одиночні і подвійні помилки, а саме, помилки виду: 10, 01, 11, 011, 101, 0101, 1001, 01001, 10001, 010001, 100001, 0100001, 1000001, 01000001, 10000001, 010000001.

Система передачі інформації з використанням завадостійких рекурентних несистематичних кодів. Завадостійкість повідомлення забезпечується шляхом надання йому надлишковості (перевірочних символів). Найбільш раціонально надлишковість використовується при використанні завадостійких кодів.

Рекурентні (згортальні) коди використовуються для кодування безперервної послідовності двійкових символів шляхом введення в цю послідовність спеціальних перевірочних символів [6].

Для кожного інформаційного символу вихідної послідовності формується спеціальний перевірочний символ, так що закодований сигнал можна записати у вигляді $Si(1) Sp(2) Si(3) Sp(4) Si(5) Sp(6) \dots Si(2k-1) Sp(2k) \dots$, де k – номер вихідних інформаційних символів.

Тут всі непарні тактові номери відносяться до інформаційних символів, всі парні – до перевірочних. Рекурентні коди такого типу називаються систематичними.

Згортальні двійково-кодові сигнали можна сформувати, перетворивши двома цифровими нерекурсивними фільтрами вихідну послідовність $S(k)$. Рекурентні коди такого типу називаються несистематичними.

Формувач складається з двох нерекурсивних фільтрів з дискретними передавальними функціями та пристрою перетворення двох паралельних сигналів в одну послідовність [7].

Якщо дискретні передавальні функції фільтрів дорівнюють $H_1(z) = Q_1(z)$, $H_2(z) = Q_2(z)$, то z - перетворення вихідного сигналу дорівнює

$$S_1(z) = S(z) Q_1(z), S_2(z) = S(z) Q_2(z).$$

Розглянемо найпростіший формувач з передавальними функціями фільтрів:

$$H_1(z) = 1 + z^{-1} + z^{-2}, H_2(z) = 1 + z^{-2}.$$

Структурна схема такого формувача зображена на рисунку 1.

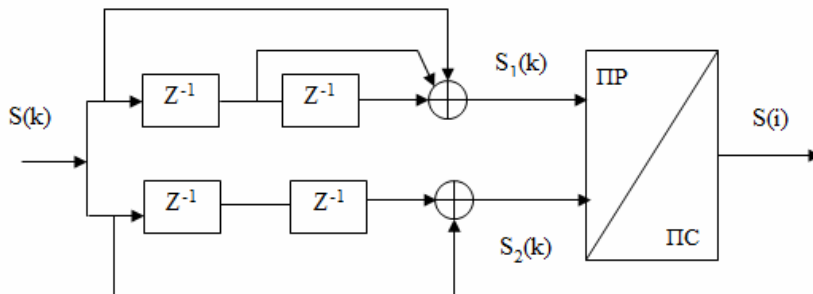


Рисунок 1 – Формувач несистематичних кодів з передавальними функціями фільтрів

Процес формування описується різницевиими рівняннями

$$S_1(k) = S(k-2) \oplus S(k-1) \oplus S(k),$$

$$S_2(k) = S(k-2) \oplus S(k).$$

Для дослідження перешкодостійких несистематичних кодів розглянемо функціональну схему цифрової системи зв'язку (рис. 2).

У моделі джерела повідомлення формується повідомлення з шістдесяти чотирьох знаків Zj .

Дані моделі джерела повідомлення поступають до формувача інформаційних кодів, у якому кожному знаку повідомлення Zj ставиться у відповідність кодова комбінація $Sj(k)$, яка міститься у банку кодів і складається з восьми символів (чотирьох нулів і чотирьох одиниць). Сформовані інформаційні коди надходять до блоку інформаційних кодів, де вони запам'ятовуються.

Отримані інформаційні кодові комбінації $Sj(k)$ поступають до формувача перешкодостійких кодів, де відбувається перетворення вихідних кодових комбінацій $Sj(k)$ двома цифровими нерекурсивними фільтрами з передавальними функціями $H_1(z)$ і $H_2(z)$ відповідно. Отримані кодові комбінації $Sj_1(k)$ та $Sj_2(k)$ поступають на блок паралельно-послідовного перетворення. Таким чином, формується перешкодостійка послідовність кодових символів $S(i)$, у якій на всіх

непарних позиціях знаходяться інформаційні символи, а на парних – перевірочні. Послідовність кодових символів $S(i)$ передається по каналу зв'язку, який піддається дії зовнішніх завад $\square(i)$. Тобто, вихідні дані з блоку паралельно-послідовного перетворення підсумовуються по модулю два з перешкодами: $x(i)=S(i)+\zeta(i)$. У якості перешкоди використовується дискретний білий шум.

Перекручена послідовність символів $x(i)$ поступає на блок послідовно-паралельного перетворювання, яка розділяється на дві послідовності: $x_1(k)$ – непарні позиції послідовності $x(i)$, $x_2(k)$ – парні позиції. Отримані послідовності $x_1(k)$ та $x_2(k)$ поступають до формувача синдрому та на суматор по модулю два. Синдром $C(k)$ поступає до формувача сигналу перешкоди, в якому формується послідовність для виправлення інформаційного сигналу. У блок виправлення помилки надходить сформований сигнал перешкоди $\zeta^*(k)$ та сигнал $x(k)=x_1(k)+x_2(k)$. На виході даного блоку отримуємо послідовність двійкових символів $S^*(k)$.

У блок декодування надходить виправлена послідовність $S^*(k)$ та інформаційні коди $Sj(k)$. Після чого відбувається декодування, тобто кожний інформаційний код перетворюється на один з шістдесяти чотирьох знаків повідомлення Zj .

У блоці обробки результатів відбувається порівняння початкової послідовності з виправленою для того, щоб визначити кількість неперекручених знаків, кількість перекручених знаків і кількість виправлених знаків повідомлення.

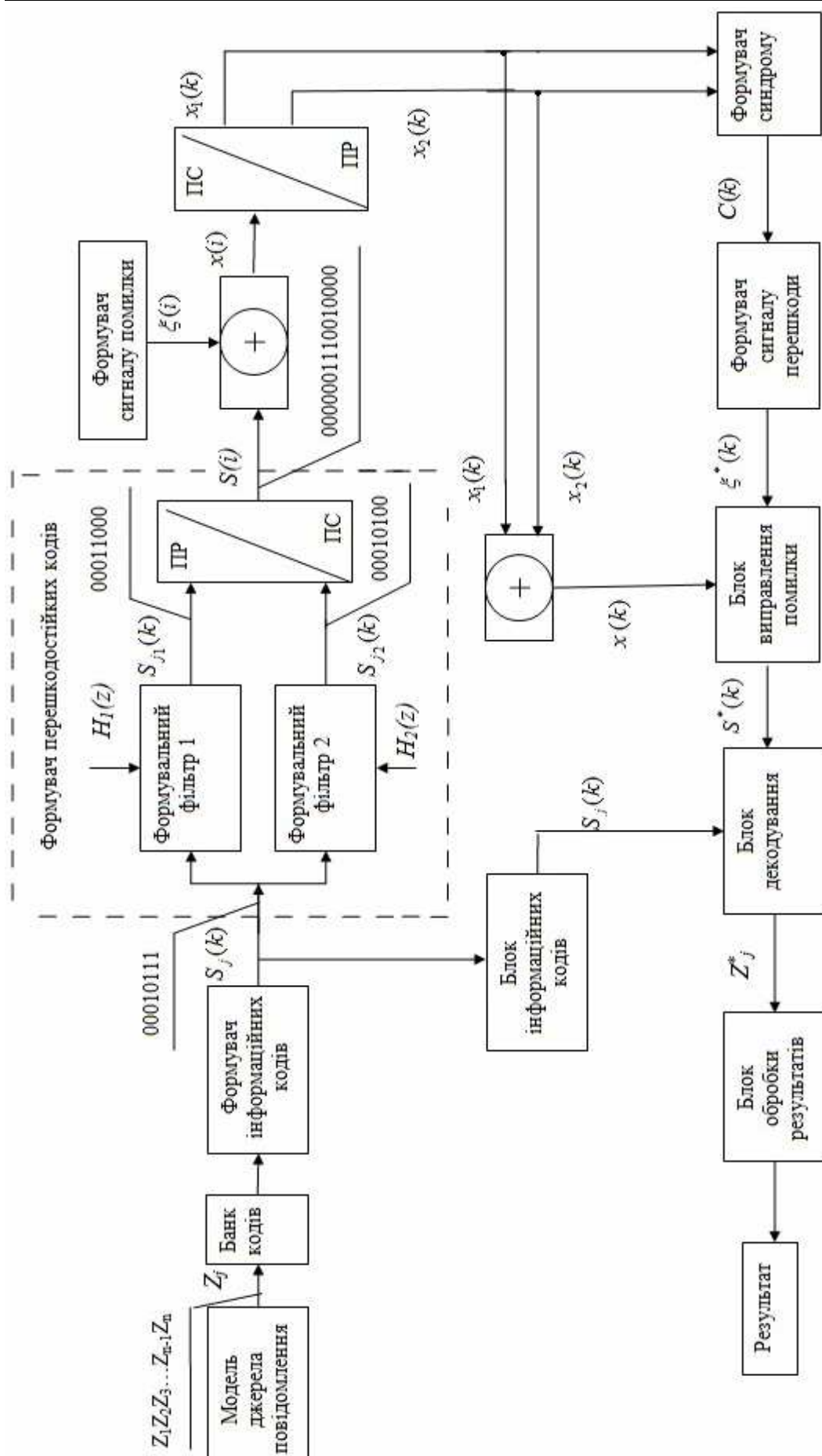


Рисунок 2 - Функціональна схема цифрового каналу зв'язку з використанням рекурентних несистематичних кодів.

Алгоритми роботи системи передачі інформації з використанням завадостійких рекурентних несистематичних кодів.

1) Алгоритм формування повідомлень.

В комп'ютерній моделі даний алгоритм являється першим, згідно з яким кожному знаку повідомлення Z_j ставимо у відповідність восьми розрядний двійковий код $S_j(k)$, який складається з чотирьох нулів і чотирьох одиниць, а текст повідомлення, перетворюється на строку кодових символів.

2) Алгоритм формування перешкодостійких кодових комбінацій.

Якщо дискретні передавальні функції фільтрів дорівнюють $H_1(z)=Q_1(z)$ і $H_2(z)=Q_2(z)$, то перетворення вихідних символів дорівнюють $S_1(z)=S(z)\cdot Q_1(z)$, $S_2(z)=S(z)\cdot Q_2(z)$.

Розглянемо формувач з передавальними функціями $H_1(z)=1+z^{-1}+z^{-2}+z^{-4}$ і $H_2(z)=1+z^{-3}+z^{-4}$.

Процес формування описується різницеvими рівняннями (1)

$$\begin{aligned} S_1(k) &= S(k) \oplus S(k-1) \oplus S(k-2) \oplus S(k-4), \\ S_2(k) &= S(k) \oplus S(k-3) \oplus S(k-4). \end{aligned} \quad (1)$$

3) Алгоритм формування сигналу помилки.

Перешкоди, які діють в каналі зв'язку, будемо розглядати як дискретний білий шум. За допомогою генератора рівномірно розподілених випадкових чисел на інтервалі від 0 до 1 генерується послідовність $r(i)$, та формується послідовність $\zeta(i)=\text{sgn}[p-r(i)]$.

4) Алгоритм блоку перекручення сигналу.

У блоці перекручення інформації відбувається складання за модулем два перешкодостійкої послідовності з сигналом перешкоди. Тобто $x(i)=S(i)+\zeta(i)$. Таким чином, перекручення в перешкодостійкій послідовності $S(i)$ будуть на тих позиціях коду, де сигнал перешкоди дорівнює одиниці.

5) Алгоритм блоку ПС/ПР перетворення

Послідовність $x(i)$, яка поступає на вхід блоку ПС/ПР перетворення, розділяється на дві паралельні послідовності $x_1(k)=x(2k-1)$, $x_2(k)=x(2k)$. Отже, можна записати

$$x_1(k) = S_1(k) \oplus \xi_1(k) \quad x_2(k) = S_2(k) \oplus \xi_2(k).$$

6) Алгоритм блоку формування синдрому

Запишемо z-перетворення сигналів $x_1(k)$ та $x_2(k)$:

$$x_1(z) = S(z) \cdot Q_1(z) \oplus \xi_1(z), x_2(z) = S(z) \cdot Q_2(z) \oplus \xi_2(z).$$

Перетворимо прийняті сигнали $x_1(k)$ та $x_2(k)$ фільтрами з передавальними функціями $H_1(z)=Q_2(z)$ і $H_2(z)=Q_1(z)$.

Їх z-перетворення дорівнюють

$$Y_1(z) = Q_2(z) \cdot x_1(z) = S(z) Q_1(z) Q_2(z) \oplus Q_2(z) \xi_1(z),$$

$$Y_2(z) = Q_1(z) \cdot x_2(z) = S(z) Q_1(z) Q_2(z) \oplus Q_1(z) \xi_2(z).$$

Сума $Y_1(z)$ та $Y_2(z)$ дорівнює синдрому (2)

$$C(z) = Q_2(z) \cdot \xi_1(z) \oplus Q_1(z) \cdot \xi_2(z). \quad (2)$$

7) Алгоритм блоку формування сигналу перешкоди.

Помножимо (2) на z^{-4} . Сигнали $C(z) \cdot z^{-4}$ та $C(z)$ подамо на схему збіжності

$$A(z) \cdot z^{-i} (I \ I) A(z) \cdot z^{-j} = L(z) = \begin{cases} A(z) \cdot z^{-j}, j = i; \\ 0, j \neq i \end{cases}.$$

Позначивши $\xi_1(z) + \xi_2(z) = \xi(z)$, одержимо

$$C(z) \cdot z^{-4} = \xi(z) \cdot z^{-4} \oplus \xi_1(z) \cdot z^{-5} \oplus \xi_1(z) \cdot z^{-6} \oplus \xi_2(z) \cdot z^{-7} \oplus \xi(z) \cdot z^{-8},$$

$$L(z) = C(z) (I \ I) C(z - 4) = \xi(z) \cdot z^{-4} = \xi^*(z).$$

8) Алгоритм блоку виправлення помилок.

Запишемо z-перетворення суми сигналів $x_1(k)$ та $x_2(k)$:

$$x(z) = x_1(z) \oplus x_2(z) = S(z) [Q_1(z) \oplus Q_2(z)] \oplus \xi_1(z) \oplus \xi_2(z).$$

Отже, z-перетворення оцінки сигналу буде дорівнювати $S^*(z) = x(z) \cdot z^{-4} \oplus L(z)$.

Побудуємо детектор помилок шляхом формування поточних значень кодових відстаней синдрому $C(k)$ із синдромами перекручувань $C_j(k)$, $j=1...16$:

$$d_j(k) = \sum_{i=0}^7 [C_j(8-i) \oplus C(k-i)].$$

Якщо на виході вимірника кодових відстаней поставити граничні пристрої прийняття рішень

$$R_j(k) = \text{sgn}[0,5 - d_j(k)],$$

то при $dj(k)=0$ $Rj(k)=1$. У цьому випадку формується оцінка $\xi_j^*(k)=\xi_1^*(k)+\xi_2^*(k)$, що надходить на суматор за модулем 2. Також на цей суматор подається затриманий на 7 тактів сигнал $x(k)$. Таким чином, детектор помилок складається з вимірників кодових відстаней (ВКВ), граничних пристроїв (ГП) і формувачів кодів помилок (ФП).

Модель каналу зв'язку з модернізованим детектором помилок зображена на рисунку 3.

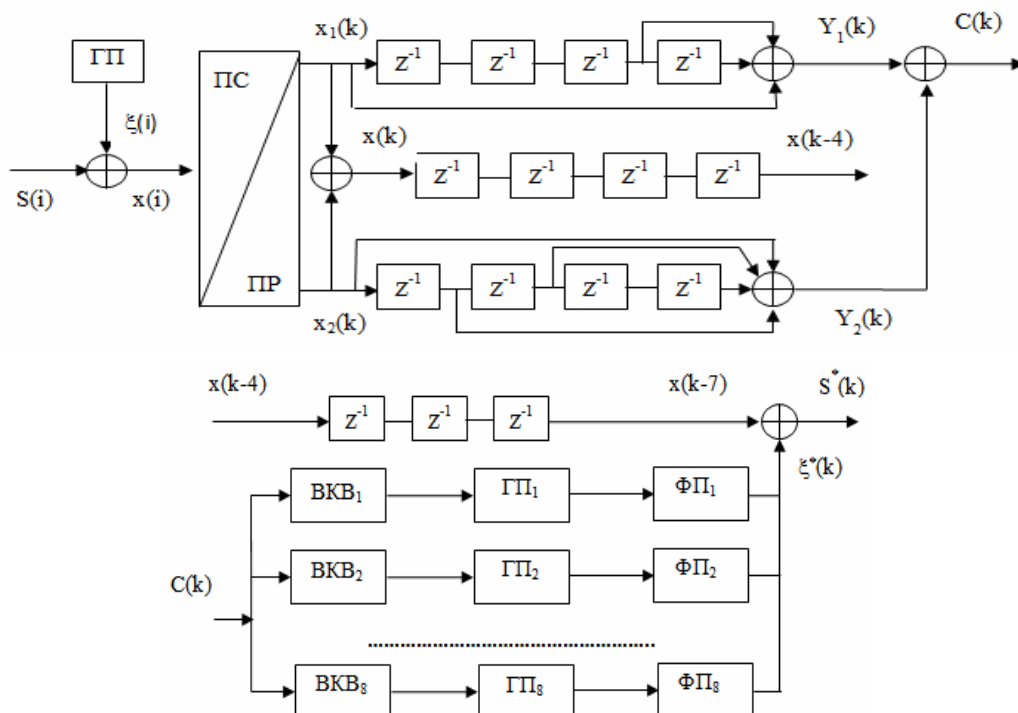


Рисунок 3 – Модель каналу зв'язку на основі рекурентних несистематичних кодів з модернізованим детектором помилок

Вимірник кодових відстаней здійснює функцію порівняння синдрому помилки з заданим синдромом. Якщо синдроми рівні, то спрацьовує пороговий пристрій і формувач помилки видає відповідний помилці сигнал, який і дає виправлення перекручених кодових комбінацій. Таким чином, спроектований детектор помилок виправляє усі обрані види перекручень.

9) Алгоритм блоку декодування.

Згідно з банком інформаційних кодів $Sj(k)$ відбувається декодування отриманої виправленої послідовності $S^*(k)$, тобто кожний інформаційний код перетворюється на один з шістдесяти чотирьох знаків повідомлення Zj .

Інформаційна технологія завадостійкого цифрового зв'язку. На основі функціональної схеми системи передачі інформації з використанням рекурентних несистематичних кодів розроблено програмне забезпечення інформаційної технології завадостійкого цифрового зв'язку. На початку роботи вводяться значення кількості знаків повідомлення, що необхідно передати, та задається ймовірність появи помилки в каналі зв'язку. Наприклад, $N=1000$ та $p=0.01$ (рис.4).

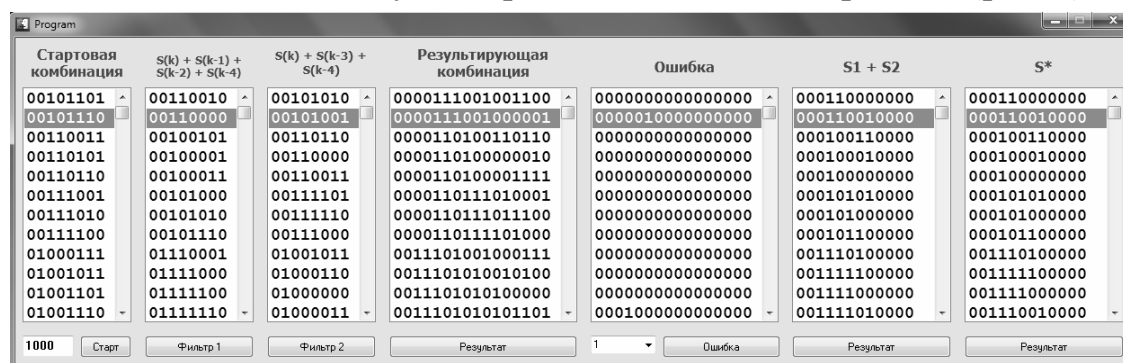


Рисунок 4 – Комп'ютерна програма інформаційної технології завадостійкого цифрового зв'язку

Після введення необхідних значень необхідно натиснути на кнопку «Старт» та будуть сформовані знаки повідомлення Z_j .

При натяті кнопок «Фильтр1» та «Фильтр2» будуть сформовані інформаційні коди $S_1(k)$ та $S_2(k)$, що відповідає процесу перетворення вихідного сигналу через цифровий нерекурсивний фільтр 1 та фільтр 2 з передавальними функціями $H_1(z)$ і $H_2(z)$ відповідно.

Для того, щоб отримати завадостійкі коди $S(i)$ для кожного знаку повідомлення, необхідно натиснути на кнопку «Результат».

Далі необхідно отримати сигнал перешкоди $\xi(i)$, що буде діяти в каналі зв'язку, нажав на кнопку «Ошибка».

Аналізуючи рисунок 5, можна зробити висновки, що при наявності сигналу помилки в каналі зв'язку $\xi(i) = 0000010000000000$, інформаційний сигнал $S^*(k)$ був прийнятий правильно, тобто помилка була виправлена.

Експериментальна перевірка роботи інформаційної технології. Розглянемо процес відновлення сигналу, використовуючи модель каналу зв'язку з модернізованим детектором помилок. У таблиці 1 міститься порахований синдром для перекручення виду

$\xi(i)=1010000000000000$. Знайдемо поточні значення кодових відстаней $d_j(k)$ для отриманого синдрому.

Таблиця 1

Значення кодових відстаней для синдрому $C(k)=110101000$.

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C(k)	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d(k)	4	5	3	5	4	4	6	0	5	3	2	4	2	3	3	3

Як впливає з даних таблиці 1, кодова відстань дорівнює нулю у випадку $d(8)=0$, коли збурення мають вигляд $\xi(i)=1010000000000000$ і сума збурень за першим і другим каналами $\xi^*(k)=110$.

У таблиці 2 поданий процес виправлення помилки за рахунок перевертання виду $\xi(i)=1010000000000000$ для інформаційного сигналу $S(k)=00000000$.

Таблиця 2

Процес відновлення сигналу для $\xi(i)=1010000000000000$

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S(k)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x ₁ (k)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x ₂ (k)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x(k)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R ₄ (k)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$\xi^*(k)$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
x(k-7)	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
S [*] (k)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Аналізуючи таблицю 2, помітно, що прийнятий сигнал $S^*(k)$ співпадає з вихідним інформаційним сигналом $S(k)$, навіть при наявності помилки $\xi(i)=1010000000000000$ в каналі зв'язку, тобто помилка була виправлена модернізованим детектором помилок.

Висновки. У даній статті було досліджено метод перешкодостійкого кодування на основі несистематичних рекурентних кодів. Побудована функціональна схема цифрової каналу зв'язку з використанням завадостійких рекурентних несистематичних кодів. На основі функціональної схеми розроблена комп'ютерна програма інформацій-

ної технології цифрового каналу зв'язку. Описано алгоритм роботи інформаційної технології системи зв'язку, а саме: формування повідомлення, формування перешкодостійкого кодування, перекручення перешкодостійкої двійково-кової комбінації, виявлення і виправлення перекручень, обробки результатів моделювання. Перевірена працездатність інформаційної технології шляхом проведення експериментів.

Отже, розроблена інформаційна технологія завадостійкості цифрового каналу зв'язку з використанням рекурентних несистематичних кодів дозволяє виявляти та виправляти одиночні та двійні помилки, що діють в каналі зв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Биков М.М. Метод підвищення пропускну здатності каналу передачі за рахунок використання потенціальних кодів / М.М. Биков, Т.В. Грищук, Н.О. Кучерук // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 201с.
2. Борисенко О.А. Завадостійка передача даних на базі факторіальних чисел / О.А. Борисенко, О.Є. Горячев // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 201с.
3. Василенко С.В. Модель забезпечення цілісності інформаційних об'єктів із застосуванням узагальненого завадостійкого коду умовних лишків / С.В. Василенко // Моделювання та інформаційні технології. – 2010. - №55. – С.29-33.
4. Ратайчук И.А. Исследование помехоустойчивости цифрового канала связи с использованием недвоичных кодов Рида-Соломона / И.А. Ратайчук, В.И. Шульгин // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2011. - №1. – С.108-112.
5. Тоцкий А.В. Способ повышения помехоустойчивости цифровой системы связи на основе биспектрально-организованной модуляции / А.В. Тоцкий, В.В. Науменко // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010. - №2. – С.27-31.
6. Глухин В.И. Информационная безопасность и защита данных: учебное пособие / В.И. Глухин. – Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2011. – С.13.
7. Дронь М.М. Основи теорії захисту інформації: Навч.посіб. / М.М. Дронь, В.П. Малайчук, О.М. Петренко. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2001. – С.87.

М.О. Матвеева

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ПО СХЕМЕ ПОЛНОГО
ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
СОСТАВА И СВОЙСТВ ОТЛИВОК
ИЗ ПОЛОВИНЧАТЫХ ЧУГУНОВ**

Аннотация. Решение задачи сочетания в отливках из чугуна определенного комплекса эксплуатационных свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость и жаростойкость сопряжено со значительными трудностями, так как повышение уровня одного из свойств может вызывать снижение остальных или некоторых из них. Для решения такой компромиссной задачи было применено математического планирования эксперимента. Благодаря которому получена максимальная информация об объекте исследования (многокомпонентном сплаве) при минимальном количестве опытов. При этом на объект оказывали действие многие факторы – химический состав сплава, его легирование и модифицирование. Получено математическое описание влияния каждого фактора на функцию оптимизации. В результате проведенных исследований установлено, что комплексу необходимых свойств отвечали сплавы, содержащие 6,0 % алюминия и модифицированные комплексом $\text{Ce} + \text{TiCN} + \text{SiC}$.

В области литейного производства созданы физико-химические основы технологических процессов и проводятся научные исследования по изучению основных закономерностей процессов плавки, легирования, модифицирования черных и цветных сплавов. Дальнейшие фундаментальные работы направлены на исследование процессов структурообразования в модифицированных чугунах и сталях и создание на этой основе прогрессивной теории формирования их структуры [1, 2, 3]. Также претерпел значительные качественные изменения методологический, технический и аппаратный арсенал средств научных исследований.

Анализ состояния вопроса. Ранее повышение качества отливок реализовывали путем все более значительного и не всегда обоснован-

ного легирования, используя такие дефицитные для Украины и дорогостоящие элементы, как Mo, V, Cr, Ni, Nb, W и др., запасы которых не восполняются. Для современных чугунов желательным является легирование и модифицирование теми элементами, сырье для которых имеется в Украине. При этом содержание дефицитных компонентов надо сводить к минимуму и исследовать возможность комплексного легирования малodeфицитными экономичными элементами, к числу которых относятся алюминий, титан, кремний, хром и др. [4, 5].

Отливки из чугуна сочетающего определенный комплекс эксплуатационных свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость и жаростойкость необходимы для: оснастки при литье по выплавляемым моделям, деталей печного оборудования, деталей коксохимического оборудования, изложниц, тиглей для плавки и многих других. Решение подобной задачи сопряжено со значительными трудностями, так как повышение уровня одного из свойств может вызывать снижение остальных или некоторых из них [6, 7].

Для решения такой компромиссной задачи – получения комплекса трудно сочетаемых свойств материала – необходимо применение математического планирования эксперимента, которое обусловлено необходимостью повышения экономической и научной эффективности проводимых исследований. Это позволяет не только свести до минимума трудозатраты для получения необходимой научной или технологической информации, но и обеспечить ее оптимальный для данных условий вариант, а при необходимости и получить расчетный аппарат в виде математического описания исследуемого процесса.

Цель настоящих исследований. Применение математического планирования эксперимента для эффективного выполнения поисковых многофакторных исследований легирования и модифицирования белых и половинчатых чугунов с целью получения прогнозируемого комплекса износостойкости, жаростойкости и коррозионной стойкости отливок. Задача планирования эксперимента состояла в математическом описании влияния каждого фактора на функцию оптимизации.

В качестве исходной лигатуры использовали чугун следующего химического состава (% , по массе): углерод 2,8 – 2,9; марганец 0,40 – 0,45; кремний 0,70 – 0,75; хром 0,09 – 0,10; ферроцерий 0,3 (по

присадке). Содержание алюминия и модифицирующих присадок варьировали в интервале: Al от 2,0 до 6,0 %; TiCN от 0,0 до 0,1 %; SiC от 0,0 до 0,05 %.

Подматрица планирования ПФЭ, в том числе и в натуральном масштабе при трех факторах, варьируемых на двух уровнях, приведена в табл. 1. На практике использовали прием рандолизации, порядковый номер очередного опыта выбирали случайным образом. Тем самым оказалось возможным избежать систематических ошибок при проведении эксперимента (дрейф характеристик во времени).

Таблица 1

Подматрица планирования ПФЭ

Номер опыта	Номер плавки	Кодированные значения факторов			Натуральный масштаб, % по массе		
		X ₁	X ₂	X ₃	SiC	TiCN	Al
1	2	-	-	+	0,05	0,1	6,0
2	4	+	-	-	-	0,1	6,0
3	6	-	+	-	0,05	-	6,0
4	8	+	+	+	-	-	6,0
5	1	-	-	-	0,05	0,1	2,0
6	7	+	-	+	-	0,1	2,0
7	3	-	+	+	0,05	-	2,0
8	5	+	+	-	-	-	2,0

В соответствии с поставленными задачами исследований, сформулировали основные требования к отливкам, работающим при высоких температурах в коррозионно-абразивной среде (табл. 2). Состав чугуна считали оптимизированным, если он отвечал приведенному комплексу свойств.

Для описания исследуемого объекта выбрали математическую модель, содержащую линейные члены и взаимодействия первого порядка. Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + A_4x_1x_2 + A_5x_1x_3 + A_6x_2x_3 + A_7x_1x_2x_3 \quad (1)$$

где Y - целевая функция;

A₀ ... A₇ – выборочные коэффициенты регрессии.

В настоящей статье в качестве примера рассмотрим микротвердость структурных составляющих и твердость отливок из экспериментальных чугунов (табл. 3). На основе этих данных определяли

коэффициенты регрессии (табл. 4). Подставляя полученные коэффициенты в модельное уравнение (1), получали математическое описание изучаемого свойства. Отсеивание коэффициентов регрессии осуществляли по результатам вычисления доверительного интервала, который должен быть меньше коэффициента регрессии в случае значимого влияния данного фактора на исследуемый параметр.

Таблица 2

Основные требования к экспериментальным чугунам

Параметр	Величина параметра	
	допустимая	желательная
Обязательные свойства		
Жаростойкость при 900 °С, г/(м ² час) 750 °С, г/(м ² час)	не более 0,5	0,4 – 0,5
Скорость коррозии в 5 %-ной серной кислоте (Км-), г/(м ² час)	менее 0,030	0,025 – 0,010
Коэффициент относительной износостойкости, К1: абразив песок абразив карбид кремния	не менее 3,5 не менее 2,5	4,0 – 4,5 3,0 – 3,5
Желательные свойства		
Микротвердость карбидной составляющей, МПа	не менее 7000	7500 – 9000
Микротвердость металлической матрицы, МПа	не менее 4000	5000 – 7000
Твердость, НВ	не менее 300	450 – 490
Прочность (σ_b), МПа	не менее 350	500 – 600
Плотность, кг/м ³	не менее 6500	6900 – 7200

Таблица 3

Свойства отливок из комплексно модифицированных и легированных алюминием чугунов

№№ плавки	Микротвердость карбидной составляющей, МПа	Микротвердость металлической матрицы, МПа	Твердость, НВ
8	7389	4659	490
3	7180	7101	350
7	7969	4540	289
2	8933	6145	367
5	9451	6600	324
6	10719	6035	492
4	8263	5683	365
1	10105	6691	472

Коэффициенты регрессии

Параметр	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇
Микротвердость карбидной составляющей, МПа	8751,13	-	-	-	883,38	218,38	294,38	-
Микротвердость металлической матрицы, МПа	5931,75	-	561,25	167	-320,5	-	-450,5	101,75
Твердость, НВ	393,63	-26,63	20,38	-19,63	19,63	42,13	25,63	34,88

В результате анализа регрессионных зависимостей влияния легирования алюминием и комплексного модифицирования на микротвердость структурных составляющих экспериментальных чугунов установлено следующее. Изменение количества и состава структурных составляющих привело к изменению свойств чугуна. С увеличением количества алюминия микротвердость карбидной фазы и эвтектоида незначительно снизилась на 20 и 8 % соответственно, также уменьшилась и твердость отливок с 472 до 367 НВ. Полученное распределение, форма и размеры карбидной фазы в отливках с 5,98 – 6,0 % Al и образование легированного эвтектоида, благоприятно повлияли на свойства чугуна: сохранился достаточно высокий общий уровень твердости и микротвердости, а свойства отдельных структурных составляющих выравнивались.

Зависимости микротвердости карбидной составляющей ($H_{50K}C$), полученные в результате регрессионного анализа показаны на рис. 1. Влияние модифицирующих добавок изменяется при увеличении содержания алюминия. При 2 % Al (см. рис. 1, а) карбонитрид титана положительно влияет на микротвердость цементита при уменьшении количества SiC. Влияние TiCN при 4% алюминия уменьшается и преобладающим становится воздействие карбида кремния (см. рис. 1, б). Микротвердость карбидной составляющей при 6% Al уменьшается с увеличением концентрации обоих модифицирующих добавок (см. рис. 1, в).

Различное влияние модифицирования TiCN и SiC при разном содержании алюминия оказывает влияние и на микротвердость металлической матрицы (H_{50MM}). Результаты регрессионного анализа показаны на рис. 2. В табл. 3 приведено среднее значение микротвердости перлита, но он отличался значительной неоднородностью.

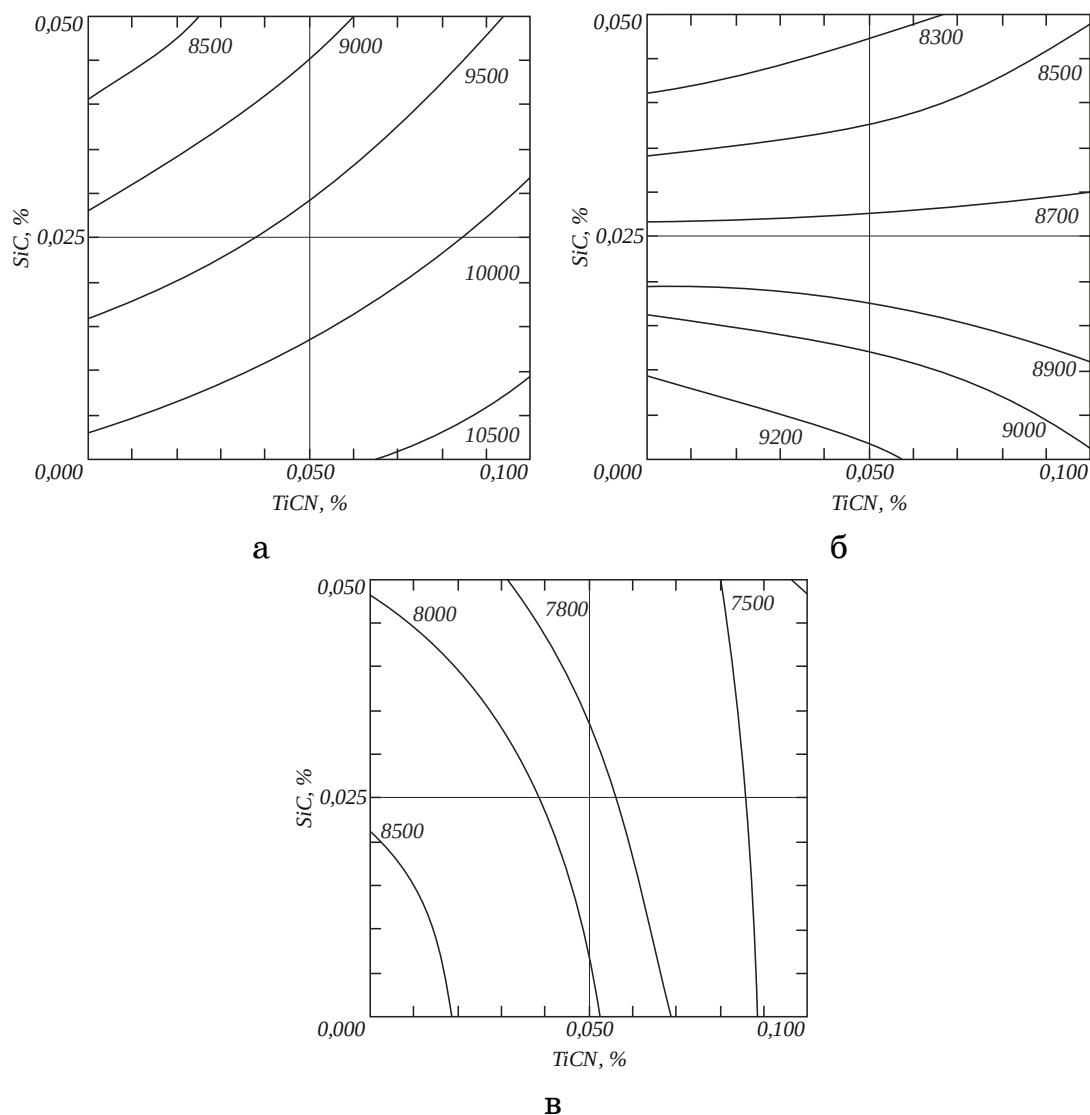


Рисунок 1 – Двумерное сечение поверхности отклика зависимости:
а - $H_{50KC} = f(TiCN, SiC)$ при 2 % Al; б - $H_{50KC} = f(TiCN, SiC)$ при 4 % Al; в - $H_{50KC} = f(TiCN, SiC)$ при 6 % Al

При небольшом содержании алюминия перлит был трех основных типов с микротвердостью – 6006, 5749 и 3173 МПа. С увеличением количества Al однородность эвтектоида повысилась, но среднее значение H_{μ} стало ниже 4540 МПа. Значения микротвердости металлической матрицы при 2 % алюминия имеют две области максимальных значений при низкой (0,013 % SiC; 0,04 % TiCN) и высокой

(0,038 % SiC; 0,04 % TiCN) концентрации модифицирующих добавок. При содержании алюминия 2...4 % с увеличением количества TiCN микротвердость эвтектоидной составляющей увеличилась на 15 %, увеличение содержание SiC снижает этот показатель.

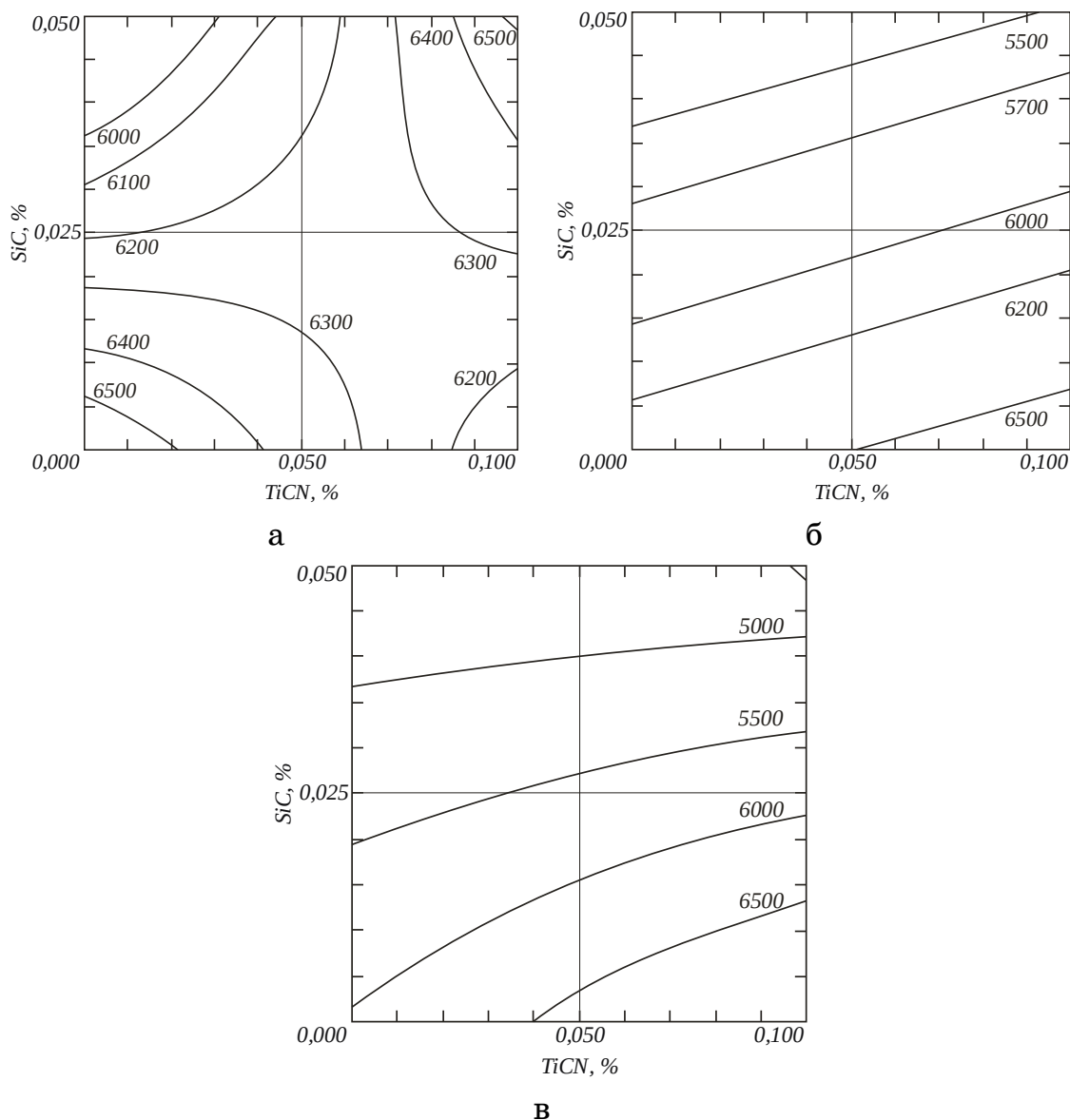


Рисунок 2 – Двумерное сечение поверхности отклика зависимости:
а - $H_{50MM} = f(TiCN, SiC)$ при 2 % Al; б - $H_{50MM} = f(TiCN, SiC)$
при 4 % Al; в - $H_{50MM} = f(TiCN, SiC)$ при 6 % Al

В результате анализа регрессионных зависимостей влияния легирования алюминием и комплексного модифицирования на твердость слитков экспериментальных чугунов установлено, что при содержании алюминия 2 % основное влияние на твердость оказывает содержание карбида кремния, твердость возрастает с уменьшением

его содержания, влияние карбонитрида титана незначительно (рис. 3). С увеличением концентрации алюминия до 4 % эффект от влияния TiCN на твердость возрастает, при этом рост твердости происходит с уменьшением содержания карбида кремния и увеличением содержания карбонитрида титана (рис. 3, б). При увеличении содержания алюминия до 6% увеличение твердости происходит при увеличении содержания обоих модифицирующих добавок (рис. 3, в).

Самые низкие значения твердости (289...324 НВ) отмечены в образцах плавок 7 (6 % Al, SiC) и 5 (2 % Al, SiC, TiCN). Это связано с наличием значительного количества графита в структуре и уменьшением количества карбидной составляющей, неравномерным распределением структурных составляющих и крупнозернистой структурой. И хотя микротвердость структурных составляющих в чугунах плавки 5 достаточно высока, влияние выше перечисленных факторов является преобладающим.

В группе сплавов с 2 % алюминия небольшая твердость (365 НВ) была у отливок модифицированных SiC, в их структуре выявлен пластинчатый графит с неравномерным распределением, неоднородная матрица (сочетание участков белого и серого чугуна), меньшая микротвердость цементита.

На твердость слитков из чугунов с 6 % алюминия влияние оказывают следующие факторы: количество карбидной составляющей, равномерность структуры, микротвердость ее отдельных составляющих. Высокая твердость образцов плавки 8 (6 % Al, SiC, TiCN) в основном обусловлена значительным количеством карбидной составляющей и равномерностью структуры.

Желательные значения твердости также имеют образцы плавок 1 (2 % Al) и 6 (2 % Al, TiCN). В их структуре есть небольшое количество графита шаровидной формы и с равномерным распределением, высокая микротвердость структурных составляющих. В чугунах плавки твердость также повышается за счет образования пластинчатого ледебурита и измельчения структуры.

В результате проведенных исследований твердости выделены три группы чугунов, легированные 2 % алюминия, легированные 2 % алюминия и модифицированные TiCN, а также легированные 6 % алюминия и модифицированные SiC, TiCN, как отвечающие желательным значениям.

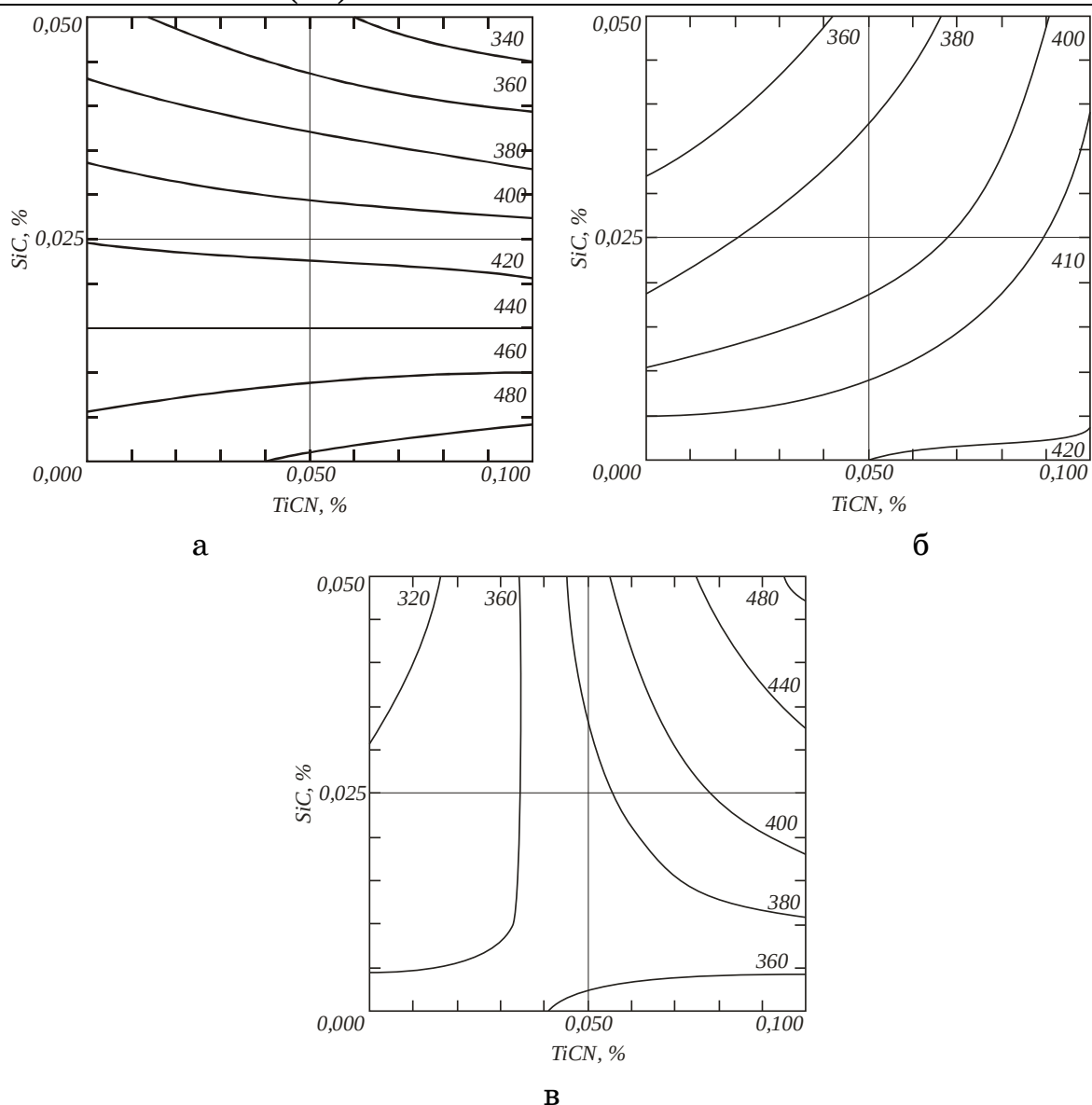


Рисунок 3 – Двумерное сечение поверхности отклика зависимости:
а - $HV = f(TiCN, SiC)$ при 2 % Al; б - $HV = f(TiCN, SiC)$ при 4 % Al;
в - $HV = f(TiCN, SiC)$ при 6 % Al

Аналогичный анализ проведен и для остального комплекса необходимых свойств (см. табл. 2) и установлен отвечающий им сплав: содержащий 6,0 % алюминия и модифицированный комплексом $Se + TiCN + SiC$.

Отливки из опытного чугуна прошли испытания в промышленных условиях частного научно-производственного предприятия «КАРИОН-СЕРВИС» (г. Днепропетровск), где были использованы в качестве литых коробов для спекания керамических стержней в электропечах камерного типа. По результатам оценки работы коробов

и опок в промышленных условиях установлено, что комплексное легирование и модифицирование обеспечивает повышение физико-механических и специальных свойств чугуна на 20 – 25 % по сравнению с ЧХ1, ЧХ2, ЧХ3;

Выводы. Благодаря применению планирования эксперимента получена максимальная информация об объекте исследования (многокомпонентном сплаве) при минимальном количестве опытов. При этом на объект оказывали действие многие факторы – химический состав сплава, его легирование и модифицирование. В результате проведенных исследований установлено, что комплексу необходимых свойств отвечали сплавы, содержащие 6,0 % алюминия и модифицированные комплексом $\text{Ce} + \text{TiCN} + \text{SiC}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Л. Х. Теоретические основы и практические методы получения литых прокатных валков из комплексномодифицированных чугунов: дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04/Иванова Людмила Харитоновна – Д., 2007.–499 с.
2. Соценко О. В. Научные основы структурообразования, разработка и внедрение технологии крупногабаритных каландровых валов для бумагоделательных машин: автореф. дис. на соискан. учен. степени докт. техн. наук : спец. 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов», 05.16.04 «Литейное производство» / О. В. Соценко. – Д., 1995. – 46 с.
3. Калинин В. Т. Научные основы прогрессивных технологий модифицирования и легирования чугунов для отливок металлургического оборудования: дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04 / Калинин Василий Тимофеевич. – Д., 2005. –399 с.
4. Матвеева М. О. Белые износостойкие чугуны легированные марганцем, титаном и азотом / М. О. Матвеева // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С. 29–32.
5. Матвеева М.О. Влияние хрома и титана на структуру и свойства белых чугунов / М. О. Матвеева // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 1. – С. 54–57.
6. Чугун / [Шерман А. Д., Жуков А. А., Абдуллаев Е. В. и др.]; под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. -1-е изд. - М. : Металлургия, 1991. - 576 с.
7. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны / Ю. Г. Бобро.- М. : Металлургия, 1976. - 288 с.

В.М. Козлов, В.П. Хлынцев, В.В. Калениченко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОГЕРЕНТНОЙ НУКЛЕАЦИИ НА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЙ

Аннотация. Проведено теоретическое исследование влияния кристаллизационного перенапряжения на вероятность возникновения межзеренных (высокоугловых) границ в гальванических покрытиях. Показано, что образование поликристаллической структуры покрытий цинка, осаждаемых на собственном монокристалле, возможно только при перенапряжениях, превышающих некоторое критическое значение. Рассмотренный механизм перехода от монокристаллического строения к поликристаллической структуре гальванопокрытий цинка подтвержден экспериментально.

Ключевые слова. Электрокристаллизация, некогерентные зародыши, вероятность некогерентного зародышеобразования, высокоугловые границы, монокристалл цинка.

Актуальность темы и постановка задачи. Электрохимический метод нанесения металлических покрытий используется во многих отраслях техники. Расширение возможностей применения гальванопокрытий связано с развитием различных аспектов теории электроосаждения металлов, важное место среди которых занимает вопрос о механизме образования кристаллических несовершенств в гальванических покрытиях. В наших работах [1-3] на основе обобщения структурных экспериментальных данных, полученных при исследовании электроосажденных металлов с разным типом кристаллической решетки, было высказано предположение, что механизм образования основной массы кристаллических несовершенств двумерного типа в электролитических покрытиях (высокоугловых, дислокационных и двойниковых границ) носит универсальный характер и связан со стадией некогерентного зародышеобразования.

Впервые модель некогерентного зародыша была использована Р. Керном в разработанной им теории возникновения двойников рос-

та, как одного из видов структурных дефектов в металлах с ГЦК кристаллической решеткой [4]. Было принято во внимание, что одним из элементарных актов кристаллизации ГЦК металлов является процесс образования двумерных зародышей на гранях растущего кристалла, в частности на плотноупакованных гранях (111). При этом предполагалось, что некоторые из зародышей с определенной степенью вероятности попадают в "ошибочное" двойниковое положение. Последующий рост таких зародышей приводит к возникновению двойников роста в закристаллизованной металлической фазе. Исходя из этих положений, был проведен термодинамический анализ стадии образования двумерных зародышей с двойниковой ориентацией.

Механизм образования двойников роста, предложенный Р. Керном, получил дальнейшее развитие в трудах Н. Пангарова, который провел детальное теоретическое исследование влияния некоторых факторов, контролирующих процесс электрокристаллизации металлов, на вероятность возникновения двойников роста в электролитических осадках металлов с ГЦК решеткой [5].

Следует подчеркнуть, что в ряду кристаллических несовершенств, присутствующих в гальванопокрытиях с любым типом кристаллической решетки, особое место занимают высокоугловые границы, определяющие размер и форму зерен электролитических осадков, от которых существенно зависят многие физико-механические и химические свойства покрытий. Поэтому теоретический анализ механизма возникновения высокоугловых (межзеренных) границ в гальванопокрытиях на основе модели некогерентного зародыша представляется весьма актуальным.

Целью данной работы было проведение теоретического анализа стадии некогерентного зародышеобразования при электрокристаллизации металлов применительно к возникновению высокоугловых границ в гальванических покрытиях и экспериментальная проверка полученных закономерностей на примере электролитического цинка, осажденного на поверхность собственного монокристалла.

Экспериментальная часть. Объектом экспериментального исследования были электролитические покрытия цинка, осажденные на базисную грань (0001) цинкового монокристалла. Монокристаллы цинка, имевшие цилиндрическую форму диаметром 8 мм, были приготовлены из цинка чистотой 99.99 % методом Бриджмена и Сток-

баргера. Из данного монокристалла при температуре жидкого азота методом механического скалывания по базисной грани были подготовлены образцы монокристалла цинка в виде дисков толщиной 2-3 мм. Непосредственно перед электролитическим осаждением поверхность монокристаллов цинка подвергалась анодной обработке. Нанесение цинковых покрытий проводилось в потенциостатических условиях при перенапряжениях от 0,02 до 0,08 вольта из высококонцентрированного сульфатно-кислого раствора ($t^{\circ}=25^{\circ}$ C) при механическом перемешивании. Толщина электроосажденных слоев цинка составляла 10-15 мкм.

Цинковые покрытия исследовались методом съемки рентгеновских обратных лауэграмм (эпиграмм). Кроме того, методом оптической микроскопии исследовалась морфология поверхности роста осажденных слоев цинка.

Результаты и их обсуждение. Согласно нашим представлениям, возникновение высокоугловых границ в электролитических осадках связано с процессом некогерентного зародышеобразования, то есть предполагается, что при электрокристаллизации металлов, наряду с образованием зародышей, попадающих в кристаллографически правильное (нормальное) положение, возникают некогерентные зародыши, разориентированные на угол θ относительно оси, перпендикулярной рассматриваемой грани (рис.1). Последующий рост некогерентных зародышей приводит к возникновению в гальванопокрытиях двумерных кристаллических несовершенств того или иного типа. Так как нами исследуется механизм возникновения высокоугловых границ, проведем термодинамический анализ образования двумерных некогерентных зародышей с относительно высоким углом разориентировки [3]. При нахождении работы образования такого зародыша необходимо учесть избыточную свободную энергию E , обусловленную его разориентацией. Тогда можно принять:

$$E = S \cdot \gamma, \quad (1)$$

где S - площадь контакта зародыша с поверхностью грани подложки; γ - удельная свободная энергия некогерентной связи между зародышем и собственной кристаллической гранью.

В первом приближении величину γ можно приравнять удельной свободной энергии высокоугловой границы γ_0 . Согласно теории

дислокаций величину γ_0 для каждого металла можно оценить по уравнению Рида-Шоккли [6], используя значения межатомного расстояния и упругих констант металла.

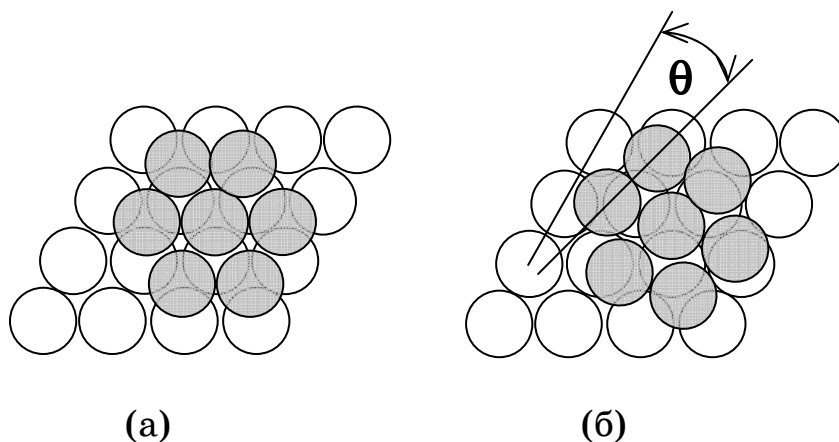


Рисунок 1 - Схема двумерного зародыша из семи атомов, возникшего на плотноупакованной грани в нормальном (а) и разориентированном (б) положениях (θ – угол разориентировки некогерентного зародыша)

С учетом вышесказанного, выражение для свободной энергии Гиббса образования некогерентного зародыша рассматриваемого типа, имеющего форму диска радиусом R и высотой H , будет иметь следующий вид:

$$\Delta G = -\frac{\pi R^2 H}{V} z e_0 \Delta \phi + 2\pi R \chi + \pi R^2 \gamma_0, \quad (2)$$

где z – зарядовое число, e_0 – элементарный электрический заряд, $\Delta \phi$ – абсолютное значение кристаллизационного перенапряжения, V – объем атома, χ – удельная краевая энергия зародыша.

Зависимость ΔG от R носит экстремальный характер. Поэтому, приравняв выражение $\frac{d(\Delta G)}{dR}$ нулю, найдем радиус критического зародыша, а после его подстановки в равенство (2) получим следующее выражение для работы образования критического некогерентного зародыша:

$$A_{\text{нк}} = \frac{\pi \chi^2 \left(\frac{V}{H} \right)}{z e_0 \Delta \phi - \gamma_0 \left(\frac{V}{H} \right)}. \quad (3)$$

Приняв $\gamma_0 = 0$ в равенстве (3), получим работу образования критического нормального (неразориентированного) зародыша:

$$A_0 = \frac{\pi\chi^2 \left(\frac{V}{H} \right)}{ze_0\Delta\phi} . \quad (4)$$

Из равенства (3) следует, что образование некогерентных зародышей рассматриваемого типа возможно только при перенапряжениях, превышающих некоторое критическое значение:

$$\Delta\phi_{кр} = \frac{\gamma_0 \left(\frac{V}{H} \right)}{ze_0} . \quad (5)$$

По формуле (5) было вычислено значение $\Delta\phi_{кр}$ применительно к электроосаждению цинка, которое оказалось равным 0,03 В, а по формулам (3) и (4) были рассчитаны значения $A_{нк}$ и A_0 в зависимости от величины перенапряжения $\Delta\phi$. Полученные результаты графически представлены на рис.2.

Видно, что при относительно низких перенапряжениях $A_{нк} \gg A_0$, но с ростом $\Delta\phi$ значения работ образования некогерентных и нормальных зародышей быстро сближаются.

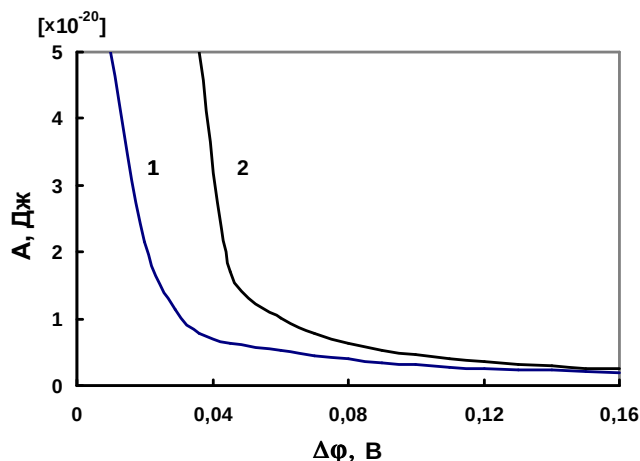


Рисунок 2 - Влияние кристаллизационного перенапряжения на работу образования нормального (график 1) и некогерентного (график 2) зародышей при электроосаждении цинка

Исходя из вероятностного характера процесса зародышеобразования, введем понятие относительной вероятности возникновения некогерентных зародышей:

$$W = \frac{W_{нк}}{W_0} , \quad (6)$$

где $W_{\text{нк}}$ – вероятность образования некогерентных зародышей, которая пропорциональна $\exp(-A_{\text{нк}}/kT)$; W_0 – вероятность образования нормальных зародышей, которая пропорциональна $\exp(-A_0/kT)$ [7]. Таким образом, относительная вероятность образования некогерентных зародышей рассматриваемого типа определяется разностью работ $A_{\text{нк}} - A_0$ согласно следующему равенству:

$$W = \exp\left(-\frac{A_{\text{нк}} - A_0}{kT}\right), \quad (7)$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Используя значения $A_{\text{нк}}$ и A_0 для электролитического цинка, по уравнению (7) была получена зависимость относительной вероятности образования некогерентных зародышей от величины кристаллизационного перенапряжения (рис.3). Из рис.3 видно, что, начиная с критического перенапряжения, равного 0,03 В, значение W сначала быстро растет с повышением $\Delta\phi$, а затем в диапазоне относительно высоких перенапряжений значение W увеличивается уже не столь значительно.

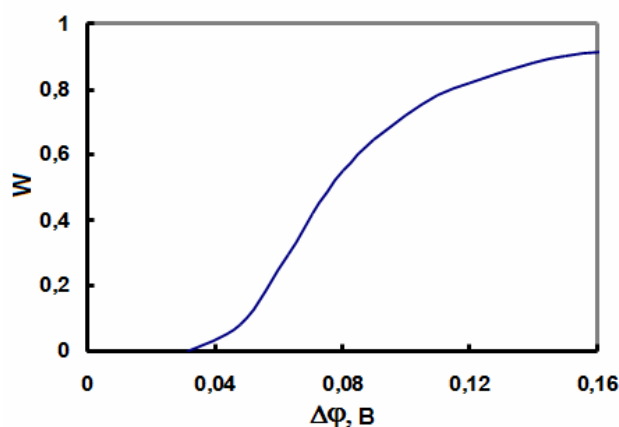


Рисунок 3 - Влияние кристаллизационного перенапряжения на относительную вероятность образования некогерентных зародышей при электроосаждении цинка

Исходя из того, что возникновение некогерентных зародышей рассматриваемого типа при их последующем росте инициирует образование высокоугловых (межзеренных) границ в электролитических осадках, относительную вероятность некогерентного зародышеобразования W можно связать со средним размером зерен D , который является количественной структурной характеристикой поликристал-

лических покрытий. Если учесть, что средний размер зерен обратно пропорционален протяженности межзеренных границ в единице объема металла [8], то тогда величина D должна быть обратно пропорциональна вероятности образования некогерентных зародышей рассматриваемого типа.

Учитывая вышесказанное, установленную закономерность влияния кристаллизационного перенапряжения на относительную вероятность образования некогерентных зародышей цинка (рис. 3) рассмотрим с точки зрения структурного фактора цинковых покрытий. Предполагается, что электролитическое осаждение цинка проводится на грань собственного монокристалла, например, на базисная грань (0001), при различных значениях кристаллизационного перенапряжения.

Согласно нашим данным значение W равно нулю при всех перенапряжениях, меньших 0,03 В (рис.3). Это означает, что при относительно малых значениях кристаллизационного перенапряжения должен происходить эпитаксиальный рост электроосаждаемых слоев цинка без образования высокоугловых границ, то есть цинковые покрытия должны иметь монокристаллическую структуру. Образование же поликристаллической структуры цинковых покрытий должно происходить при значениях $\Delta\phi$, превышающих 0,03 В. Причем, по мере увеличения кристаллизационного перенапряжения величина среднего размера зерен электролитических осадков цинка должна уменьшаться.

Для проверки полученных теоретических результатов было проведено экспериментальное исследование влияния величины катодного перенапряжения на структуру электролитических покрытий цинка, осажденных на базисную грань собственного монокристалла.

В результате проведенных исследований было установлено, что осадки цинка, полученные при относительно малых значениях перенапряжения (0,01, 0,02 и 0,03 В), были монокристаллическими, о чем свидетельствовало, с одной стороны, наличие Лауэ-пятен на рентгеновских эпиграммах (рис.4 а), с другой – пластинчатый характер морфологии поверхности роста цинковых покрытий (рис.5 а).

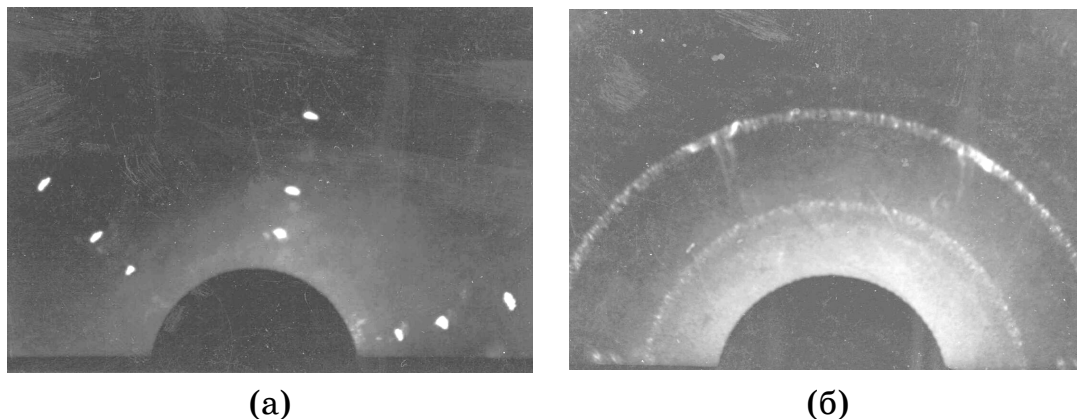


Рисунок 4 - Обратные лауэграммы электролитического цинка, осажденного на базисную плоскость монокристалла цинка при катодных перенапряжениях 0,02 В (а) и 0,04 В (б)

Также было обнаружено, что цинковые покрытия, нанесенные на базисную грань монокристалла цинка при перенапряжениях, превышающих 0,03 В, имели поликристаллическое строение. Об этом свидетельствовало наличие дебаевских колец на соответствующих эпиграммах (рис.4 б) и особый характер морфологии поверхности роста электролитических осадков цинка, соответствующий поликристаллической структуре (рис.5 б ,в, г). Причем, с ростом величины перенапряжения от 0,4 В до 0,8 В средний размер зерен цинковых покрытий существенно уменьшался.

Как известно, кристаллизационное перенапряжение является одной из составляющих общего катодного перенапряжения $\Delta\varphi^*$ [7]. Если принять, что с увеличением значения $\Delta\varphi^*$ также возрастает величина кристаллизационного перенапряжения [9,10], то, сопоставляя полученные экспериментальные данные с теоретическими результатами, можно отметить, что они находятся в достаточно хорошем согласии с предложенным механизмом образования высокоугловых границ в электролитических осадках.

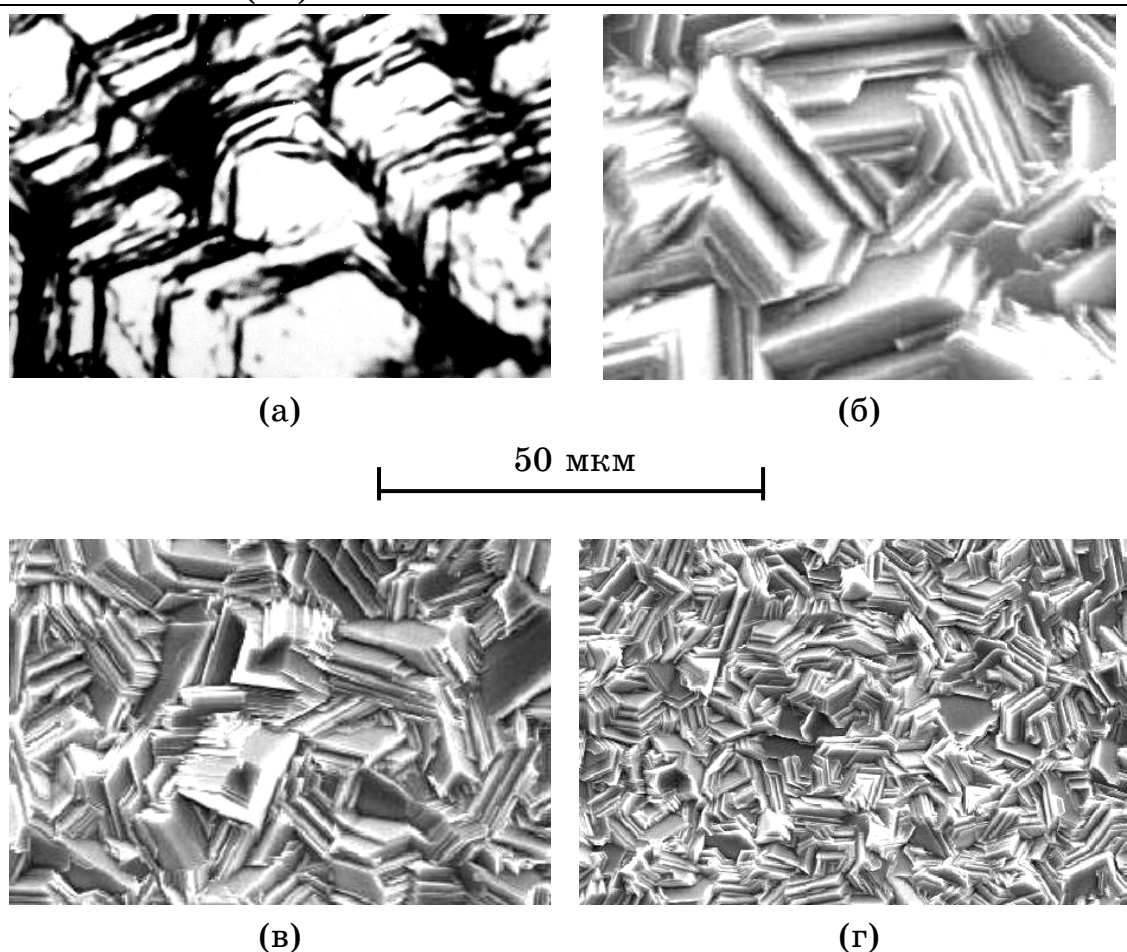


Рисунок 5 - Оптические микрофотографии поверхности электролитического цинка, осажденного на базисную плоскость монокристалла цинка при катодных перенапряжениях 0,02 В (а), 0,04 В (б), 0,06 В (в) и 0,08 В (г)

Выводы. С применением термодинамического метода исследована стадия образования некогерентных зародышей, инициирующих возникновение высокоугловых (межзеренных) границ в гальванопокрытиях, в частности, в электролитических осадках цинка.

Установлено влияние кристаллизационного перенапряжения – одного из основных факторов, контролирующих процесс электрокристаллизации металлов – на величину относительной вероятности образования некогерентных зародышей рассматриваемого типа.

Сделано заключение, что в случае электроосаждения цинка на поверхность собственного монокристалла должен наблюдаться эпитаксиальный рост, если величина перенапряжения $\Delta\varphi$ не будет превышать некоторого критического значения. В противном случае электроосажденные слои цинка должны иметь поликристаллическую

структуру, причем по мере повышения значения $\Delta\phi$ средний размер зерен покрытий должен уменьшаться.

Проведены экспериментальные исследования структуры электролитических покрытий цинка, осажденных на базисную грань цинкового монокристалла при разных значениях катодного перенапряжения, которые подтверждают теоретические результаты анализа стадии некогерентного зародышеобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.М. О связи дислокационной структуры электроосажденных металлов с некогерентным зародышеобразованием // Электрохимия. – 1981. – Т.17. – С.1325-1332.
2. Kozlov V.M., Peraldo Bicelli L. Formation of structural defects during non-coherent nucleation // J. Crystal Growth. – 1997. – Vol.177. – P.289-295.
3. Козлов В.М., Хлынцев В.П., Тимошенко В.Н. Образование структурных дефектов при электрокристаллизации металлов // Вопр. химии и хим. технологии. – 2012. – № 2. – С.191-194.
4. Kern R. Sur la formation des macles de croissance // Bull. Soc. Frans. Miner. Crist. – 1961. – Vol.84. – P.292-311.
5. Pangarov N.A. Twinning Processes in the Electrocrystallization of Face-Centred Cubic Metals // Phys. Stat. Sol. – 1967. – Vol.20. – P.371-377.
6. Рид В.Т. Дислокации в кристаллах. – М.: Иност. лит., 1957. – 160 с.
7. Феттер К. Электрохимическая кинетика. – М.: Химия, 1975. – 856 с.
8. Грабский М.В. Структура границ зерен в металлах. – М.: Металлургия, 1972. – 160 с.
9. Электроосаждение меди из сернокислого раствора / В.В. Трофименко, В.П. Житник, О.В. Походенко, Ю.М. Лошкарев // Укр. хим. журн. – 1994. – № 2. – С.175-179.
10. Трофименко В.В., Криштоп Ю.Г. Особенности стадии разряда при образовании адатомов цинка на пироуглеродном электроде из цинкатоного раствора // Укр. хим. журн. – 2007. – № 8. – С.107-112.

МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНЫХ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС КОНТАКТНЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

Аннотация. На основании более десяти тысяч измерений окружных остаточных напряжений железнодорожных колес прибором Debbie рассмотрены различные параметрические модели распределения случайной ошибки измерений. Показано, что распределение Лапласа аппроксимирует неизвестный закон распределения вероятностей случайных ошибок лучше, чем нормальное распределение Гаусса. Применение модели рассмотрено в задаче обнаружения выбросов.

Ключевые слова: модель, случайная ошибка, остаточные напряжения, железнодорожное колесо, ультразвуковой метод, выброс.

Постановка задачи. Для использования на практике вероятностного подхода к оценке погрешностей, как средств, так и результатов измерений, прежде всего, необходимо установить для данной конкретной погрешности вид аналитической модели закона распределения [1]. Необходимость в этом возникает, в частности, при разработке методик контроля качества изделий, которые измеряются со случайными ошибками. В [1] указана ошибочность предположения о том, что случайные погрешности всегда должны иметь нормальное распределение. В связи с этим возникает задача идентификации формы их распределения по экспериментальным данным.

Возможность идентификации формы распределения по экспериментальным данным ограничена, прежде всего, малостью объема выборки, особенно когда идентификация должна осуществляться по измерениям, которые выполняются не на образце или мере с известным номинальным значением измеряемого параметра, а на однотипном множестве объектов, причём в каждой точке объекта производится небольшое количество повторных измерений. Обоснованный выбор модели в таком случае должен осуществляться по множеству выборок малого объема (5-10 каждая). Такая задача возникла при об-

работке измерений остаточных напряжений железнодорожных колёс, выполненных ультразвуковым прибором Debbie, и рассматривается далее.

Экспериментальные измерения. Одним из основных факторов надежности колеса является величина остаточных напряжений. Как отмечается в европейском стандарте EN 13262 [2] и директиве немецкой железной дороги RIL 907.0801 [3], окружные остаточные напряжения могут измеряться прибором Debbie. Их величина рассчитывается прибором по значению разности времени прохождения двух поперечных ультразвуковых волн, одна из которых поляризована в окружном, а другая в радиальном направлении. Измерения осуществляются контактным методом ввода ультразвуковых колебаний с помощью пьезопреобразователя (ПЭП), как показано на рис.1а. Для создания акустического контакта используется мед либо эпоксидная смола. Качество колеса оценивают по измерениям в нескольких точках, равномерно расположенных по окружности обода (рис.1б).

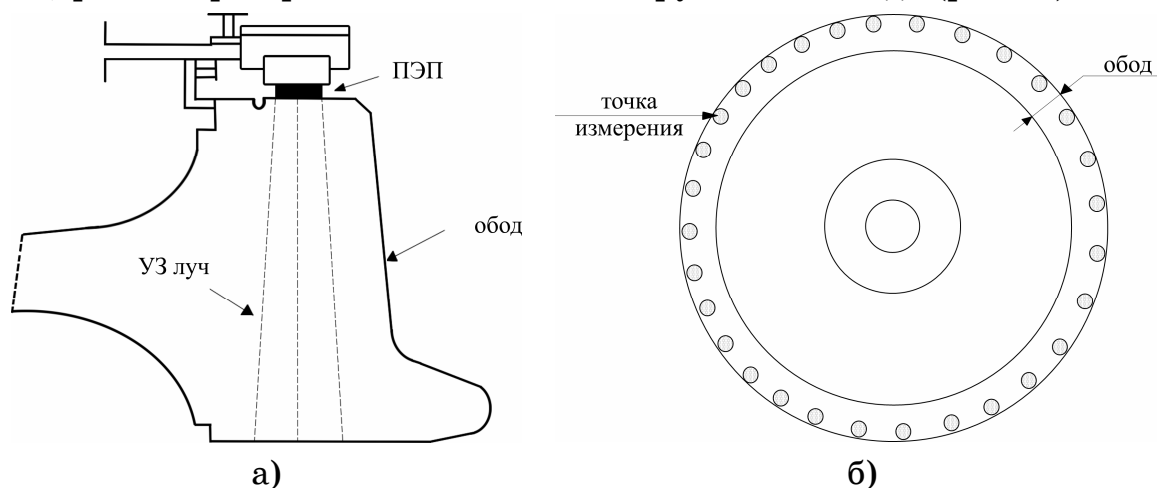


Рисунок 1 – Схема измерений остаточных напряжений:

- а) положение датчика на позиции измерений;
- б) расположение точек измерений

Как показали исследования, если после измерения датчик повторно переустановить на исходную позицию и заново повторить измерение, то полученное значение будет несколько отличаться от предыдущего. Таким образом, при повторных измерениях в одной и той же точке обода колеса, наблюдается разброс, вызванный случайной ошибкой измерений. Эта ошибка обусловлена неконтролируемыми случайными условиями измерительного процесса: нестабильность

акустического контакта, смещение положения датчика, опыт оператора и т.д.

Исследование случайных ошибок было выполнено на множестве из 89 колес K LW®. Данную группу образуют чистовые колеса из стали R7T по UIC 812-3, выбранные из различных плавок, произведенных в течение одного года. Номинальное значение шероховатости поверхности обода колес, что важно для контактного ввода ультразвуковых колебаний, составляло 6.3 Ra.

Каждое колесо измерялось в m точках по окружности обода. В каждой точке выполнялась серия из n повторных измерений с переустановкой датчика на исходную позицию после каждого измерения. Для группы, состоящей из N колес, измерения остаточных напряжений представляют собой трехмерный массив, обозначенный как $\{x_{j,i,k}, \forall x \in \mathbb{Z}\}$, $j = [1, N]$, $i \in [1, m]$, $k \in [1, n]$, $i, j, k \in \mathbb{N}$. Для рассматриваемых 89 колес количество точек по окружности было $m=25$, а количество повторных измерений было либо $n=5$ либо $n=10$.

Параметрическая модель случайной ошибки. Рассматривается аддитивная модель измерений со случайной ошибкой:

$$x_{j,i,k} = H_{j,i} + \varepsilon_{j,i,k}, \quad (1)$$

где $H_{j,i} \in \mathbb{R}$ - неизвестное значение остаточного напряжения в i -й точке обода j -го колеса; $\varepsilon_{j,i,k}$ - значение случайной величины ошибки ε при k -м повторном измерении в i -й точке обода j -го колеса из группы.

Если $f(\varepsilon)$ - неизвестная плотность распределения вероятностей ошибки, то из (1) следует, что $f(\varepsilon) = f(\varepsilon_{j,i,k}) = f(x_{j,i,k} - H_{j,i})$. Таким образом неизвестное значение $H_{j,i}$ можно рассматривать как сдвиг, который получают случайные ошибки при измерениях в i -й точке обода j -го колеса. Тогда оценкой этого неизвестного значения остаточного напряжения $H_{j,i}$ будет оценка сдвига $H_{j,i}^*$.

Рассмотрим задачу выбора параметрической модели случайной ошибки ε , т.е. плотности распределения вероятностей $g(\varepsilon)$, которая в некотором смысле хорошо аппроксимирует неизвестную плотность ошибки $f(\varepsilon)$:

$$f(\varepsilon) \approx g(\varepsilon) = g\left(\varepsilon, \left\{0, \hat{\theta}\right\}\right), \quad (2)$$

где $g(\varepsilon, \{\mu, \theta\})$ - параметрическая модель плотности распределения вероятностей ошибки, у которой число параметров равно p ; μ - параметр сдвига, $\theta \in \mathbb{R}^{p-1}$ - вектор параметров распределения без учёта параметра сдвига μ ; $\hat{\theta}$ - оценка вектора параметров θ , вычисленная по измерениям $\{x_{j,i,k}\}$. В формуле (2) принято, что ошибки сами имеют нулевой сдвиг $\mu = 0$. Если это условие не выполняется, то всегда может быть введена соответствующая поправка.

Если для ошибок выбран конкретный вид параметрической модели плотности g , то из (1) следует, что модель условной плотности вероятности распределения измерений в точке обода будет иметь вид:

$$w(x / j, i) = g\left(x - H_{j,i}, \left\{0, \hat{\theta}\right\}\right) = g\left(x, \left\{H_{j,i}, \hat{\theta}\right\}\right), \quad (3)$$

где $w(x / j, i) = g\left(x, \left\{H_{j,i}, \hat{\theta}\right\}\right)$ - модель условной плотности вероятности распределения измерений в i -й точке обода j -го колеса.

Свойство (3) позволяет определить условную логарифмическую функцию правдоподобия для вычисления оценок по измерениям группы из N колёс:

$$\ell(H, \theta / N, m, n) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \ln g\left(x_{j,i,k}, \left\{H_{j,i}, \theta\right\}\right), \quad (4)$$

где $H = \{H_{j,i}\}$, $H \in \mathbb{R}^{N \times m}$ - массив переменных (неизвестных значений напряжений).

Оценки максимального условного правдоподобия соответствуют условию

$$\{\hat{H}, \hat{\theta}\} := \arg \max \left\{ \ell(H, \theta / N, m, n); H \in \mathbb{R}^{N \times m}, \theta \in \mathbb{R}^{p-1} \right\},$$

где $\hat{H} = \{H_{j,i}^*\}$, $\hat{H} \in \mathbb{R}^{N \times m}$ - массив оценок остаточных напряжений. Таким образом, путём максимизации функции (4), кроме оценок параметров плотности ошибки $\hat{\theta}$ можно определить ещё и оценки остаточных напряжений, т.е. матрицу $\hat{H}$.

Из множества моделей некоторого параметрического семейства $\{\mu, \theta\} \in \Theta$ наилучшую модель в смысле минимума расстояния Кульбака-Лейблера можно выбрать по информационным критериям [4]. Для этой цели можно использовать информационный критерий Акаике (Akaike), скорректированный на конечную длину выборок измерений. Для измерений N колес он запишется в виде:

$$AIC_c = AIC + \frac{2(Nm + p - 1)(Nm + p)}{Nm(n - 1) - p}, \quad (5)$$

где $AIC = -2\ell(\hat{N}, \hat{\theta} / N, m, n) + 2(Nm + p - 1)$. Среди моделей параметрического семейства Θ следует выбрать ту модель, для которой значение AIC_c наименьшее.

Рассмотрено два класса обобщающих распределений. Это класс распределений Пирсона тип-IV и обобщённое нормальное распределение.

Распределение Пирсона тип-IV задаётся плотностью

$$g(\varepsilon, \mu, \theta) = \frac{\Gamma(b)s^{2b-1}}{\sqrt{\pi}\Gamma(b - \frac{1}{2})} \left| \frac{\Gamma(b + \frac{h}{2}\sqrt{-1})}{\Gamma(b)} \right|^2 \left[s^2 + (\varepsilon - \mu)^2 \right]^{-b} \exp \left[-h \arctg \left(\frac{\varepsilon - \mu}{s} \right) \right],$$

где $\theta = \{b, h, s\}$ - вектор параметров за исключением параметра сдвига μ ; При значении $h = 0$ и замене $b = (v + 1) / 2$, $s = \sqrt{v\sigma^2}$ из плотности распределения Пирсона тип-IV получают симметричное нестандартизованное распределение Стьюдента с параметрами μ и $\theta = \{s, v\}$. Предельным случаем нестандартизованного распределения Стьюдента, когда $v \rightarrow \infty$, является нормальный закон распределения Гаусса с параметрами μ и $\theta = \{\sigma\}$.

Обобщённое нормальное распределение задаётся плотностью

$$g(\varepsilon, \mu, \theta) = \frac{k}{2\alpha\Gamma(1/k)} \exp \left(- \left| \frac{\varepsilon - \mu}{\alpha} \right|^k \right),$$

где $\theta = \{k, \alpha\}$. Это распределение симметричное и включает в себя как распределение Лапласа (при $k = 1$), так и нормальное распределение (при $k = 2$) с математическим ожиданием μ и дисперсией рав-

ной $\alpha^2 / 2$. Так как производная плотности данного распределения может иметь разрыв, то для вычисления оценок максимального правдоподобия использовался алгоритм, приведенный в [5].

Из представленных обобщающих распределений можно вывести и другие, более частные случаи. Для вычисления оценок необходимо, в общем случае, использовать численные методы, однако для распределения Лапласа и нормального закона могут быть получены аналитические формулы. Можно показать, что для нормального закона распределения формулы для вычисления оценок максимального правдоподобия имеют вид:

$$H_{j,i}^* = \bar{x}_{j,i}; \quad \sigma^{*2} = \frac{1}{Nmn} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n (x_{j,i,k} - \bar{x}_{j,i})^2, \quad (6)$$

где $\bar{x}_{j,i}$ - среднее значение измерений в i -й точке обода j -го колеса.

Для распределения Лапласа формулы оценок максимального правдоподобия, основываясь на [6], можно записать следующим образом:

$$H_{j,i}^* = \text{med}_{j,i}^*; \quad \alpha^* = \frac{1}{Nmn} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |x_{j,i,k} - \text{med}_{j,i}^*|, \quad (7)$$

где $\text{med}_{j,i}^*$ - оценка медианы измерений в i -й точке обода j -го колеса;

α^* - оценка параметра масштаба α распределения Лапласа.

Из формул (6) и (7) можно получить основные представления о свойствах оценок, определяемых по множеству малых выборок. С одной стороны, несмотря на то, что функция правдоподобия выражается через все измерения группы из N колёс, оценка параметра сдвига $H_{j,i}^*$ в i -й точке обода j -го колеса зависит только от сдвига в этой конкретной точке. Это связано с тем, что смешанные производные функции правдоподобия по двум параметрам сдвига из разных точек равны нулю. С другой стороны, оценка $\hat{\theta}$, параметров плотности ошибки, зависит от всех измерений N колёс. Для оценки σ^{*2} , в формуле (6), можно показать, что её математическое ожидание и дисперсия определяются выражениями:

$$E[\sigma^{*2}] = \frac{n-1}{n} \sigma^2, \quad \text{Var}[\sigma^{*2}] = \frac{2(n-1)\sigma^4}{Nmn^2}. \quad (8)$$

Как следует из (8), смещение оценок параметров распределения случайной ошибки можно уменьшить лишь путём увеличения количества измерений n в каждой точке, в то время как дисперсия оценок уменьшается как при увеличении n , так m и N .

В таб.1 приведены рассчитанные значения оценок $\hat{\theta}$ для колёс четырёх плавков с наибольшим количеством измерений: 21039 ($N=7$, $m=25$, $n=10$), 22108 ($N=15$, $m=25$, $n=5$), 31174 ($N=10$, $m=25$, $n=5$), 32174 ($N=9$, $m=25$, $n=5$), а в таб.2 представлены значения нормированного показателя $AICc / Nm$.

Из анализа результатов таб.2 следует, что у нормального распределения значение показателя $AICc$ самые максимальные, а из класса обобщённого нормального распределения ошибок, наилучшей моделью является распределение Лапласа. Из семейства распределения Пирсона тип-IV для плавков 21039 и 31174 наилучшей моделью оказалось само это распределение, что, видимо, объясняется статистически значимой асимметрией распределения ошибок измерений. В свою очередь для плавков 22108 и 32174 наилучшей моделью оказалось нестандартизированное распределение Стьюдента.

Таблица 1

Оценки максимального правдоподобия для различных плавков

Модель	Плавка			
	21039	22108	31174	32174
Распределение Пирсона тип-IV	$s^* = 3.39$; $b^* = 1.85$; $h^* = 0.56$	$s^* = 4.74$; $b^* = 2.69$; $h^* = 0.14$	$s^* = 4.45$; $b^* = 2.73$; $h^* = 1.76$	$s^* = 2.72$; $b^* = 1.64$; $h^* = 0.09$
Нестандартизированное распределение Стьюдента	$\sigma^* = 2.06$; $v^* = 2.54$	$\sigma^* = 2.27$; $v^* = 4.36$	$\sigma^* = 2.23$; $v^* = 4.24$	$\sigma^* = 1.81$; $v^* = 2.28$
Обобщённое нормальное распределение	$\alpha^* = 2.55$; $k^* = 1.02$	$\alpha^* = 3.37$; $k^* = 1.45$	$\alpha^* = 3.56$; $k^* = 1.59$	$\alpha^* = 2.72$; $k^* = 1.12$
Нормальное распределение	$\sigma^* = 3.64$	$\sigma^* = 3.00$	$\sigma^* = 2.92$	$\sigma^* = 3.33$
Распределение Лапласа	$\alpha^* = 2.39$	$\alpha^* = 2.12$	$\alpha^* = 2.08$	$\alpha^* = 2.17$

Нормированные значения показателя AICc*

Модель	Плавка			
	21039	22108	31174	32174
Распределение Пирсона тип-IV	53.4314	28.9217	27.1290	27.3922
Нестандартизированное распределение Стьюдента	53.5310	28.9146	27.2244	27.3808
Обобщённое нормальное распределение	53.5936	28.9666	27.2916	27.4951
Нормальное распределение	56.4267	29.2356	27.4047	28.7431
Распределение Лапласа	53.5194	28.4986	26.7471	27.1780

* в таблице подчёркнуты минимальные значения в рамках семейства распределений.

На рис.2 для этих четырёх плавов представлены графики плотностей распределения ошибок, которые были признаны наиболее удачными моделями из двух рассмотренных параметрических семейств. Штрихованной линией показаны плотности распределения Лапласа, а сплошной, в зависимости от плавки, либо плотность распределения Пирсона тип-IV, либо плотность нестандартизированного распределения Стьюдента.

Анализ моделей на рис.2, показывает, что распределения ошибок похожие для рассмотренных плавов. Значительная асимметрия распределения наблюдается только для плавки 31174, что возможно вызвано некоторым отличием условий выполнения измерений в сравнении с остальными плавками.

Если предположить, что распределение случайной ошибки не зависит от плавки, то оценки параметров распределения могут быть подсчитаны по всему массиву измерений 89 колёс. Такие оценки приведены в таб.3 наряду со значением показателя AICc / Nm.

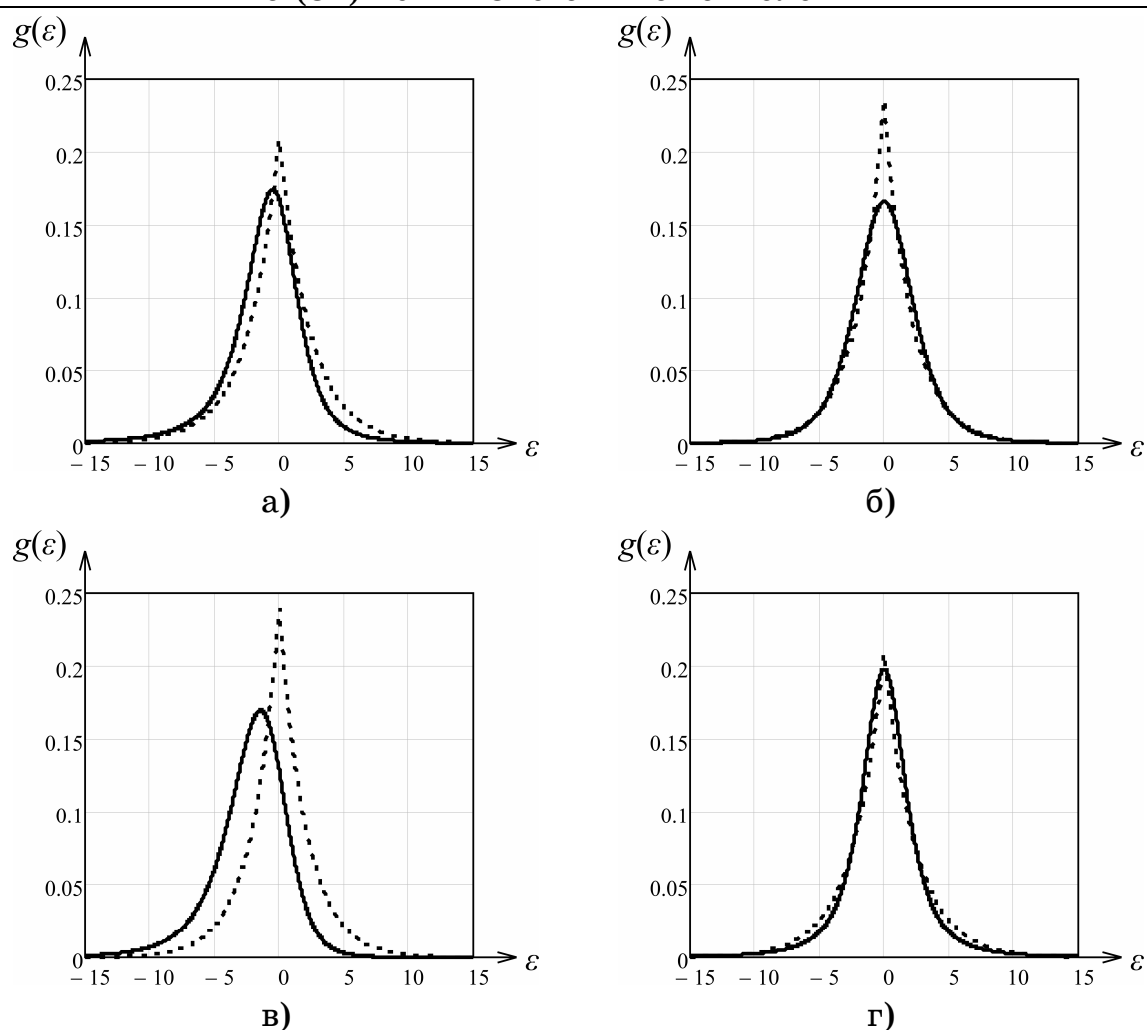


Рисунок 2 – Модели плотностей вероятности распределения ошибок измерений для плавков: а) 21039, б) 22108; в) 31174; г) 32174

Таблица 3

Значения оценок максимального правдоподобия и нормированного показателя AICc для группы из 89 колёс

Модель	Оценки параметров	AICc / Nm
Распределение Пирсона тип-IV	$s^* = 3.61;$ $b^* = 2.01;$ $h^* = 0.314$	33.6495
Нестандартизированное распределение Стьюдента	$\sigma^* = 2.08;$ $\nu^* = 2.97$	33.6653
Обобщённое нормальное распределение	$\alpha^* = 3.07;$ $k^* = 1.26$	33.7127
Нормальное распределение	$\sigma^* = 3.16$	34.4542
Распределение Лапласа	$\alpha^* = 2.18$	33.2527

Как следует из данных таб.3, наилучшие модели случайной ошибки по критерию Акаике – это распределение Пирсона тип-IV и распределение Лапласа. На рис.3 показаны графики плотностей данных распределений в одном масштабе с гистограммами оценок значений ошибок (остатков), которые рассчитывались по формуле:

$$\varepsilon_{j,i,k}^* = x_{j,i,k} - H_{j,i}^*.$$

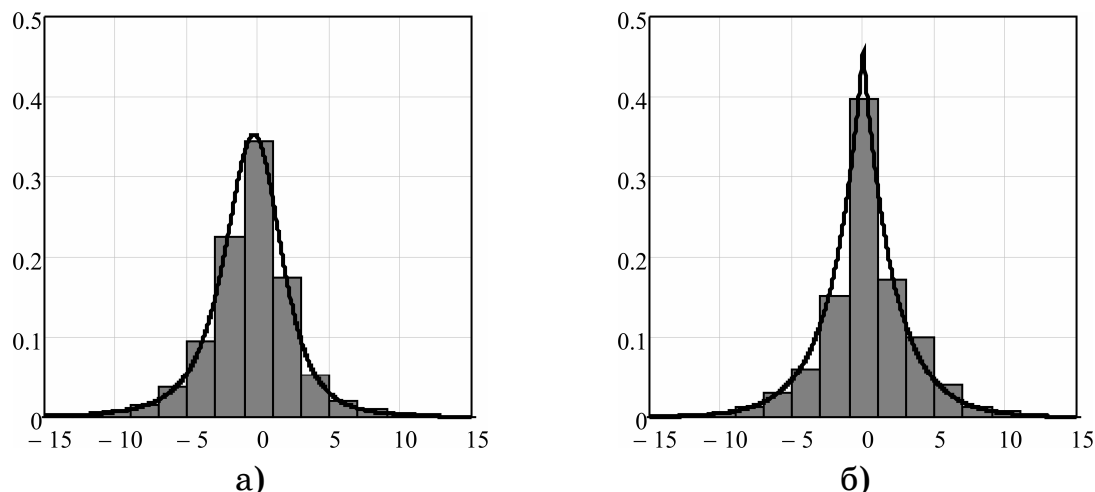


Рисунок 3 – Модели плотностей вероятности распределения ошибок и гистограммы остатков для измерений 89 колёс:

а) распределение Пирсона тип-IV; б) распределение Лапласа

Из определения модели (1) следует, что разность

$$\Delta \varepsilon_{j,i,k} = x_{j,i,2k} - x_{j,i,2k-1} = \varepsilon_{j,i,2k} - \varepsilon_{j,i,2k-1} \quad (9)$$

представляет собой последовательность некоррелированных случайных величин, плотность распределения которых полностью определяется плотностью распределения ошибки ε и может быть представлена в виде интеграла свёртки:

$$f(\Delta \varepsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\varepsilon) f(\varepsilon - \Delta \varepsilon) d\varepsilon. \quad (10)$$

Путём замены в (10) неизвестной плотности $f(\varepsilon)$ на модель $g(\varepsilon)$ получим модель $g(\Delta \varepsilon)$ плотности распределения разности (9). Таким образом, модели плотностей разности на основе распределений Лапласа и распределения Пирсона тип-IV можно сравнить с гистограммой разностей, представленной на рис.4.

Как следует из рис.4, модели плотности (10), выраженные через распределения Лапласа и Пирсона тип-IV, практически совпадают

и аппроксимируют гистограмму разностей примерно с одинаковой точностью.

От выбранной модели закона распределения случайной ошибки зависит тип оценок остаточных напряжений $\{H_{j,i}^*\}$. Например, для нормального закона – это средние значения измерений в точках, для распределения Лапласа – медианы, а для распределения Пирсона тип-IV, они не выражаются аналитически, а определяются численно из условия максимума функции правдоподобия.

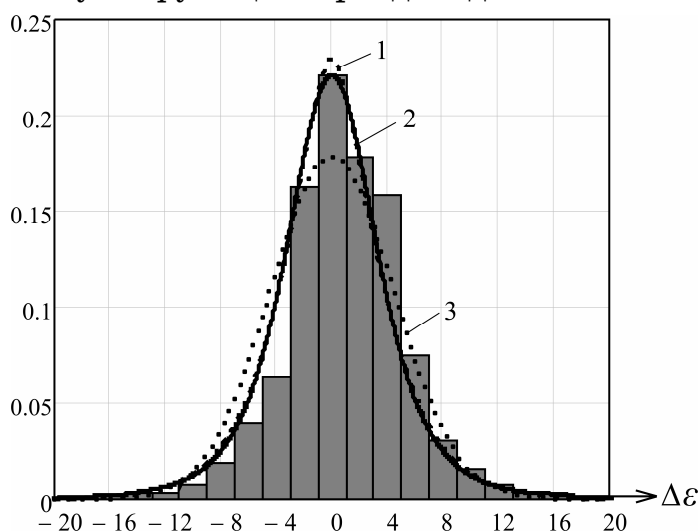


Рисунок 4 – Гистограмма разности $\Delta\varepsilon$ и её модели выраженные через распределения: 1 –Лапласа; 2 –Пирсона тип-IV; 3 –Гаусса

Сравнить два типа оценок $H_{(I)}^*$ и $H_{(II)}^*$ можно по среднеквадратическому значению их разностей

$$\sigma_{(I)-(II)}^{*2} = \frac{1}{Nm} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m \left(H_{(I),j,i}^* - H_{(II),j,i}^* \right)^2.$$

Величина $\sigma_{(I)-(II)}^*$ при сравнении медиан и средних значений равна $\sigma_{(I)-(II)}^* = 1.0$; для оценок, полученных на основе распределения Пирсона тип-IV, и средних значений $\sigma_{(I)-(II)}^* = 1.1$, а для медиан и оценок на основе распределения Пирсона тип-IV $\sigma_{(I)-(II)}^* = 1.0$. Таким образом, в среднем, оценки отличаются на достаточно малую величину около ± 2 МПа. Поэтому среднее значение измерений в точке можно использовать в качестве оценки остаточного напряжения в ней.

Критерий обнаружения выбросов. Правило обнаружение выбросов при многократных измерениях может быть получено из Лапласовой модели случайной ошибки. Если x - случайная величина с распределением Лапласа, параметр сдвига которой μ и масштаб α , то случайная величина

$$\zeta = \frac{2}{\alpha} \sum_{k=1}^n |x_k - \mu|$$

будет иметь распределение хи-квадрат с $2n$ степенями свободы независимо от значений параметров μ и α [7]. Как показывает компьютерное моделирование, если неизвестных сдвиг μ , обусловленный остаточными напряжениями, заменить средним значением $\bar{x}$, то случайная величина

$$\zeta^* = \frac{2}{\alpha} \sum_{k=1}^n |x_k - \bar{x}| = \frac{2}{\alpha} \sum_{k=1}^n |\Delta \epsilon_k^*|,$$

приблизительно будет иметь распределение хи-квадрат с $(2n-1)$ степенями свободы. В этом случае правило для обнаружения выбросов в i -й точке обода можно записать в виде:

$$z_i < z_0; \quad z_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\Delta \epsilon_{i,k}^*|; \quad z_0 = \frac{\alpha^*}{2n} \chi_{P,2n-1}^2,$$

где $\chi_{P,2n-1}^2$ - квантиль уровня $(1-P)$ распределения хи-квадрат с $(2n-1)$ степенями свободы, P - доверительная вероятность критерия, $\alpha^* = 2.18$ - оценка параметра α . Если выполняется условие $(z_i < z_0)$, то принимается, что выборка измерений остаточных напряжений в i -й точке обода колеса не содержит выбросов.

Выводы. По измерениям остаточных напряжений группы железнодорожных колес проведено обоснование выбора модели плотности вероятности распределения случайных ошибок из двух параметрических семейств: обобщенного нормального распределения (распределения ошибок) и распределения Пирсона тип-IV. Установлено, что если пренебречь асимметрией ошибок, то в качестве модели можно использовать распределение Лапласа, а оценками остаточных напряжений в точках могут быть средние значения измерений в этих точках.

Рассмотренный подход может быть применен для выбора модели распределения случайных ошибок измерений однотипных объектов контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. — [2-е изд.]. — Л: Энергоатомиздат, 1991 — 304 с.
2. Railroad applications. Wheelsets and bogies. Wheels. Product requirements: DIN EN 13262 [European standard] — DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin. Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, Germany, 2006 — 48p.
3. Richtlinie der Deutschen Bahn AG Ermittlung der Eigenspannungen im Radkranz von Vollrädern mit Ultraschall: RIL 907.0801.
4. Konishi S. Information Criteria and Statistical Modeling / S.Konishi, G.Kitagawa. — New York: Springer, 2008. — 274 p.
5. Shaoquan YU. A Review of Estimating the Shape Parameter of Generalized Gaussian Distribution / YU Shaoquan, Anyi Zhang, Hongwei LI // Journal of Computational Information Systems. — 2012. — №8 (21). — P. 9055–9064.
6. R.M. Norton. The Double Exponential Distribution: Using Calculus to Find a Maximum Likelihood Estimator / Robert M. Norton // The American Statistician (American Statistical Association). — 1984. — № 38 (2). — P. 135–136.
7. Johnson N.L. Continuous Univariate Distributions / N.L. Johnson, S. Kotz, N. Balakrishnan. — [2-nd edition]. — New York: Wiley, 1994. — 756 p.

А.Е. Балев, А.И. Михалёв, Р.В. Кирия

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ПЕРЕГРУЗОЧНЫМИ УЗЛАМИ
ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

Анотація. Проведено дослідження адаптивного налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора які показали, що для управління трикутним дільником (ТДП) потоку найбільш кращим є адаптивний ПІ-регулятор, але при цьому такий регулятор не дозволяє проводити ефективно налаштування коефіцієнтів через складність врахування впливу всіх можливих параметрів на динаміку управління ТДП в умовах поточної невизначеності. Подальшим напрямком у розвитку питань вирішення завдань адаптивного налаштування ТДП в умовах впливу негаусовських збурень, апріорної та поточної невизначеностей може з'явитися включення в контур управління нейро-нечіткого регулятора, який має більш гнучкі параметри налаштування.

Ключові слова: Ключові слова: Моделювання, адаптивне налаштування, керування, гірничий транспорт, ПІД-регулятор, трикутний дільник потоку

В настоящее время развитие горной промышленности связано с повышением уровня автоматизации и с внедрением современных компьютерных технологий управления, в частности, перегрузочными узлами ленточных конвейеров [1, 2]. При этом в качестве управляемых исполнительных элементов интерес представляет треугольный делитель потока (ТДП) для распределения выработанной породы по бункерам. В то же время существует проблема, заключающаяся в том, что из-за неравномерности поступающего груза на ТДП происходит неравномерное его распределение. В связи с этим необходимо управлять текущим положением ТДП в условиях неопределённости, постоянно анализировать взаимодействие горной породы с ТДП, оптимизировать параметры регулятора.

Поставленную задачу предлагается решать путём построения адаптивного ПИД-регулятора.

Целью работы является моделирование адаптивной системы управления перегрузочными узлами горнотранспортных машин. Для чего ставится и решается задача построения математической модели процесса управления ТДП с адаптивной настройкой коэффициентов ПИД-регулятора.

Для реализации поставленной задачи необходимо проанализировать силы, действующие на ТДП, построить математическую модель ТДП и сконструировать для него адаптивный ПИД - регулятор.

Работу ТДП можно описать следующим образом: вертикальный поток насыпного груза взаимодействует с равнобедренным ТДП с длиной боковой стороны l и углом α ее наклона к основанию (рисунок 1). Скорость и ширина потока насыпного груза равны, соответственно, V_0 и h_0 . При этом ось потока не совпадает с осью треугольника. В результате образуются два потока, движущиеся по левой и правой боковой стенке треугольника, глубиной h_1 и h_2 , соответственно.

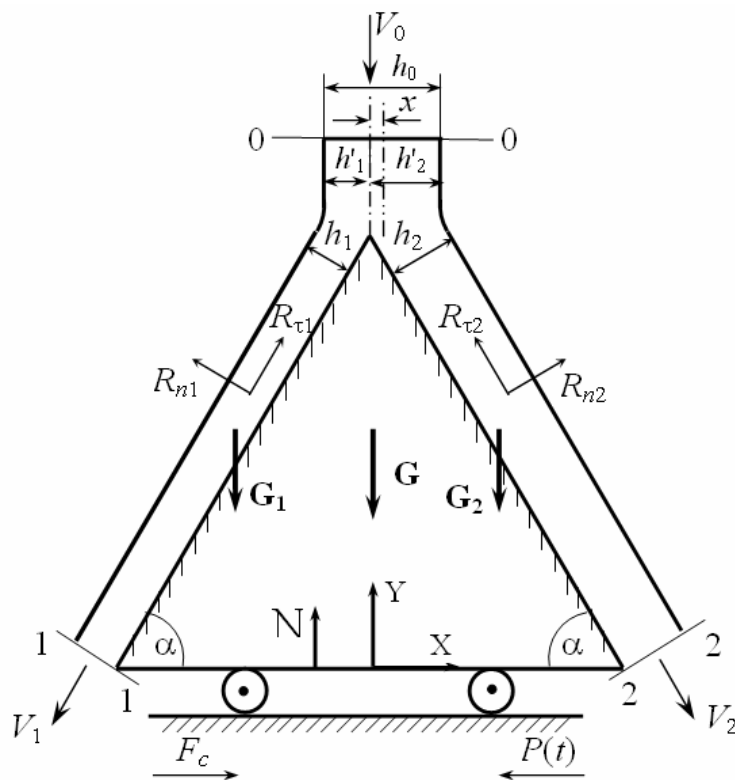


Рисунок 1 - Схема взаимодействия насыпного груза с треугольным делителем потока

Обозначим через V_1 и V_2 скорости потоков насыпного груза на выходе из треугольника. Выделим тремя перпендикулярными сече-

ниями 0-0, 1-1, 2-2 (рисунок 1) объем насыпного груза и применим к нему теорему об изменении количества движения в форме Эйлера:

$$M_0 \bar{V}_0 - M_1 \bar{V}_1 - M_2 \bar{V}_2 + \sum_i \bar{F}_{\text{пов}}^i + \sum_j \bar{F}_{\text{об}}^j = 0, \quad (1)$$

где M_0, M_1, M_2 – массовые расходы входящего и выходящих потоков насыпного груза выделенного объема, [кг/с]; $\sum \bar{F}_{\text{пов}}^i + \sum \bar{F}_{\text{об}}^j$ – суммы поверхностных и объемных сил, действующих на выделенный объем, [Н].

Спроектируем векторное равенство (1) на оси координат с учетом сил, действующих на выделенный объем (рисунок 1), получим ОХ:

$$M_1 V_1 \cos \alpha - M_2 V_2 \cos \alpha + R_{\tau 1} \cos \alpha - R_{\tau 2} \cos \alpha - R_{n1} \sin \alpha + R_{n2} \sin \alpha = 0; \quad (2)$$

$$\text{ОУ: } -M V_0 + M_1 V_1 \sin \alpha + M_2 V_2 \sin \alpha + R_{\tau 1} \sin \alpha - R_{\tau 2} \sin \alpha + R_{n1} \cos \alpha + R_{n2} \cos \alpha - P_1 - P_2 = 0 \quad (3)$$

Здесь R_{n1}, R_{n2} – нормальные составляющие сил со стороны потока насыпного груза, действующих на левую и правую боковые стенки треугольника, соответственно, [Н]; $R_{\tau 1}, R_{\tau 2}$ – касательные составляющие сил, действующих на левую и правую боковые стенки треугольника со стороны потока насыпного груза, соответственно, [Н]; P_1, P_2 – силы веса левых и правых потоков насыпного груза, [Н].

Предположим, что средние скорости левого и правого потоков насыпного груза не изменяются вдоль боковых поверхностей треугольника. Тогда для равномерного движения потока насыпного груза по наклонной плоскости, в силу равенства сил трения и составляющей веса насыпного груза, имеем:

$$R_{\tau 1} = \rho_c g h_1 l b \sin \alpha = G_1 \sin \alpha; \quad R_{\tau 2} = \rho_c g h_2 l b \sin \alpha = G_2 \sin \alpha, \quad (4)$$

где G_1 и G_2 – силы веса левого и правого потоков насыпного груза, [Н]; ρ_c – средняя плотность насыпного груза, [кг/м³], b – ширина ТДП, [м]; α – угол наклона боковой грани ТДП к горизонту, [рад].

Поток насыпного груза, взаимодействуя с плоскостями треугольника, поворачивается, как на полках. Поэтому скорости левого и правого потока в конце зоны поворота можно определить по формулам:

$$V_1 = V_0 e^{-\mu \psi_1}; \quad V_2 = V_0 e^{-\mu \psi_2}. \quad (5)$$

Здесь ψ_1, ψ_2 – углы поворота потока насыпного груза на левой и правой плоскостях треугольника соответственно, [рад]; μ – коэффициент потерь энергии насыпного груза на повороте; V_0 – скорость входного потока насыпного груза к треугольному делителю потока, [м/с].

Так как скорости потока насыпного груза вдоль плоскостей движения практически не изменяются, то скорости V_1 и V_2 на выходе из треугольника совпадают со скоростями V_{01} и V_{02} потока насыпного груза в конце зоны поворота и определяются соответственно по формулам (5).

Глубины левого и правого потоков h_1 и h_2 , согласно рисунка 1, равны:

$$x = h'_2 - h'_1; \quad (6)$$

$$h_0 = h'_1 + h'_2.$$

Проекции суммарной силы, действующей на треугольник со стороны потока насыпного груза (рисунок 1), равны:

$$R_x = (R_{n2} - R_{n1}) \sin \alpha + (R_{\tau1} - R_{\tau2}) \cos \alpha; \quad (7)$$

$$R_y = (R_{n1} + R_{n2}) \cos \alpha + (R_{\tau1} + R_{\tau2}) \sin \alpha. \quad (8)$$

После преобразования, получим следующие выражения:

$$R_x = x \rho_c V_0^2 b e^{-\mu\alpha/2} \cos \alpha; \quad (9)$$

$$R_y = \rho_c b h_0 \left[V_0^2 (1 - e^{-\mu\alpha/2} \sin \alpha) + g l e^{\mu\alpha/2} \right], \quad (10)$$

где x – горизонтальная координата центра ТДП [м], g – ускорение свободного падения, [м/с²].

Проведенные исследования влияния коэффициентов ПИД-регулятора на динамику системы показали, что дифференциальная составляющая регулятора раскачивает систему (рисунок 2) и, следовательно, в уравнении управления движением должны присутствовать силы сопротивления.

Динамика движения ТДП по горизонтальной координате x описывается следующим уравнением:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = P(t) - R_x - F_c, \quad (11)$$

где $P(t)$ – горизонтальная управляющая сила, действующая на ТДП со стороны привода [Н]; M – масса насыпного груза, [кг]; F_c – сила сопротивления, [Н].

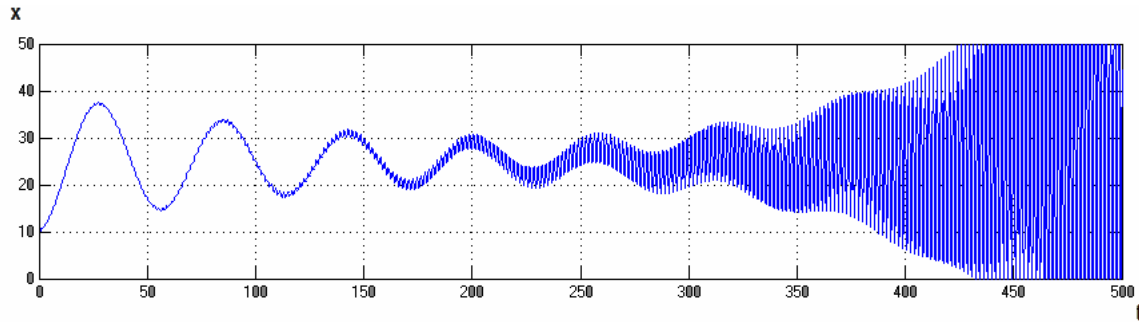


Рисунок 2 – Положение горизонтальной координаты центра тяжести ТДП при моделировании без включения сил сопротивления (по оси ординат - условные границы параметра x (рисунок 1) $[0; h_0]$; по оси абсцисс - время моделирования t)

При рассмотрении процессов, протекающих во время взаимодействия ТДП с потоком насыпного груза, можно выделить следующие силы сопротивления: силу трения качения и силу, действующую на ТДП со стороны потока насыпного груза из-за изменения динамики струи [3].

В формульном виде их можно представить следующим образом:

Сила трения качения представима формулой Кулона:

$$F_t = \frac{N}{R} \delta, \quad (12)$$

где, F_t – сила трения качения [Н], N – вес [Н], R – радиус колеса [м], δ – коэффициент трения качения [м].

Сила динамики струи представима в виде:

$$F_d = \beta \frac{dx}{dt}, \quad (13)$$

где, F_d – сила воздействия струи [Н], β – экспериментальный коэффициент затухания струи [кг/с].

Таким образом, уравнение управляемого ТДП можно представить в виде:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + \rho_c V_0^2 b e^{-\mu \alpha / 2} \cos \alpha \cdot x = P(t) - \frac{N}{R} \delta = \tilde{P}(t). \quad (14)$$

Схема контура адаптивной настройки ПИД-регулятора представлена на рисунке 3.

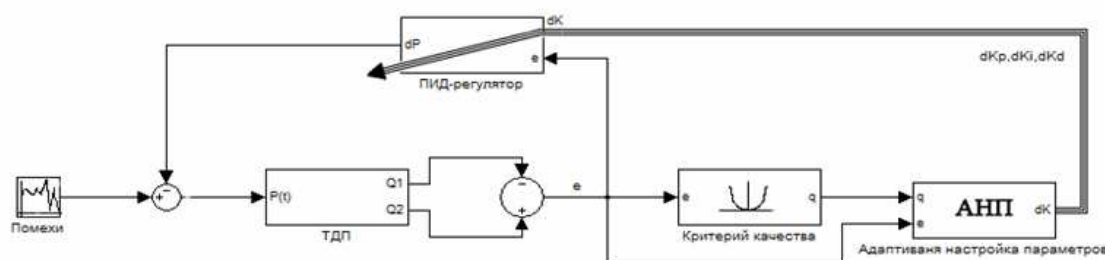


Рисунок 3 – Simulink-схема адаптивной настройки коэффициентов ПИД-регулятора для ТДП

Управляющей силой, воздействующей на ТДП, является $\tilde{P}(t)$. Выходом объекта является координата x , определяющая горизонтальное положение ТДП. Исходя из (14) можно составить передаточную функцию, исчерпывающим образом характеризующую поведение переменной x , на каждое воздействия управляющей силы:

$$\frac{\partial x}{\partial \tilde{P}} = \frac{1}{Ms^2 + \beta s + \rho_c V_0^2 b e^{-\mu \alpha / 2} \cos \alpha} \quad (15)$$

При этом уравнение (14) и передаточная функция (15) представляют собой математические модели во временной и частотном диапазонах. При этом единственным ограничением на состояние ТДП являются допустимые значения изменения $x \in [0; h_0]$, определяемые конструктивными особенностями ТДП.

Имея решение дифференциального уравнения, можно получить объёмные расходы потоков насыпного груза и сравнив их, получить критерий оценки эффективности адаптивного управления, которое как раз и состоит в уравнивании потоков насыпного груза.

$$Q_0 = Q_1 + Q_2. \quad (16)$$

Здесь $Q_{1,2}$ – объёмные расходы потоков насыпного груза левого и правого бункеров [$\text{м}^3/\text{с}$].

Объёмный расход основного потока можно выразить следующим образом:

$$Q_0 = b h_0 V_0, \quad (17)$$

При этом левый поток выражается относительно горизонтального положения ТДП:

$$Q_1 = b x V_0, \quad (18)$$

Подставив (17) и (18) в выражение (16), найдём объёмный расход правого потока:

$$Q_2 = bV_0(h_0 - x), \quad (19)$$

где b – ширина боковой стороны ТДП [м].

Соответственно ошибка или рассогласование регулирования $e(x)$, определяется как:

$$e(x) = Q_2 - Q_1 = bV_0(h_0 - 2x). \quad (20)$$

Контур адаптивного управления ТДП. Классический аналоговый ПИД-регулятор представляется законом управления вида

$$u(\tau) = K \left(e(\tau) + \frac{1}{T_I} \int_0^{\tau} e(l) dl + T_D \frac{\partial e(\tau)}{\partial \tau} \right), \quad (21)$$

где τ - непрерывное время; $u(\tau)$ - управляющий сигнал; K - коэффициент усиления; T_I , T_D - постоянные интегрирования и дифференцирования соответственно.

Введя дискретное время с достаточно малым шагом дискретизации T_0 и заменяя производную первой разностью, а интеграл суммой, по методу треугольника, получим:

$$u(\tau) = K \left(e(\tau) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=0}^t e(i-1) + \frac{T_D}{T_0} (e(t) - e(t-1)) \right), \quad (22)$$

где $t = 1, 2, \dots$ - дискретное время.

Тогда в виде рекуррентного алгоритма:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) = g_0 e(t) + g_1 e(t-1) + g_2 e(t-2), \quad (23)$$

где $g_0 = K(1 + T_D T_0^{-1})$; $g_1 = -K(1 + 2T_D T_0^{-1} - T_0 T_I^{-1})$; $g_2 = K T_D T_0^{-1}$.

Поскольку данный регулятор принадлежит к параметрически оптимизируемым дискретным регуляторам, он описывается Z -передаточной функцией

$$G_R(z^{-1}) = \frac{g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{N_R} z^{-N_R}}{1 - z^{-1}}, \quad (24)$$

При этом порядок регулятора N_R может быть ниже порядка модели объекта.

Рассмотрим задачу синтеза адаптивного ПИД-регулятора:

Пусть требуемое значение выходной величины равно y^* . Тогда уравнение ПИД - регулятора, минимизирующего ошибку $e(k) = y^* - y(k)$, имеет вид

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)], \quad (25)$$

где K_p , K_i , K_d – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей соответственно.

$$\begin{aligned}\frac{\Delta \tilde{P}(k)}{\Delta K_p} &= e(k) - e(k-1) = 2bV_0(x(k-1) - x(k)); \\ \frac{\Delta \tilde{P}(k)}{\Delta K_i} &= e(k) = bV_0(h_0 - x(k)); \\ \frac{\Delta \tilde{P}(k)}{\Delta K_d} &= e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) = 2bV_0(2x(k-1) - x(k) - x(k-2));\end{aligned}\quad (26)$$

Задача синтеза ПИД-регулятора заключается в поиске коэффициентов K_p , K_i , K_d и сводится к минимизации некоторого выпуклого функционала от ошибки управления $e(k)$. Если в качестве целевой функции выбрать

$$q(e(k)) = \exp(-\gamma e(k)^2) \rightarrow \min, \quad (27)$$

где, γ – весовой коэффициент, то использование градиентного алгоритма приводит к следующим правилам настройки регулятора:

$$\begin{aligned}\Delta K_p &= -\gamma \frac{\partial q(k)}{\partial K_p} = -\gamma \frac{\partial q(k)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tilde{P}} \frac{\partial \tilde{P}(k)}{\partial K_p}; \\ \Delta K_i &= -\gamma \frac{\partial q(k)}{\partial K_i} = \gamma \frac{\partial q(k)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tilde{P}} \frac{\partial \tilde{P}(k)}{\partial K_i}; \\ \Delta K_d &= -\gamma \frac{\partial q(k)}{\partial K_d} = \gamma \frac{\partial q(k)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tilde{P}} \frac{\partial \tilde{P}(k)}{\partial K_d},\end{aligned}\quad (28)$$

где $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ – приращение каждого из коэффициентов ПИД-регулятора – пропорционального, интегрального и дифференциального, соответственно; y – выход объекта; $\frac{\partial x}{\partial \tilde{P}}$ – градиент, который опре-

деляется передаточной функцией (15), а

$$\frac{\partial q(k)}{\partial x} = \frac{\partial q(k)}{\partial e} \frac{\partial e(k)}{\partial x} = 4\gamma e(k) \exp(-\gamma e(k)^2) bV_0.$$

Для анализа результатов было выбрано начальное значение для каждого коэффициента ПИД-регулятора, равное -1 , а значение весового коэффициента $\gamma = 0.1$.

Анализ процесса изменения значений коэффициентов адаптивного ПИД-регулятора показал, что значение экспериментального коэффициента затухания струи для оптимального регулирования должно быть не меньше 15 (рисунок 4)

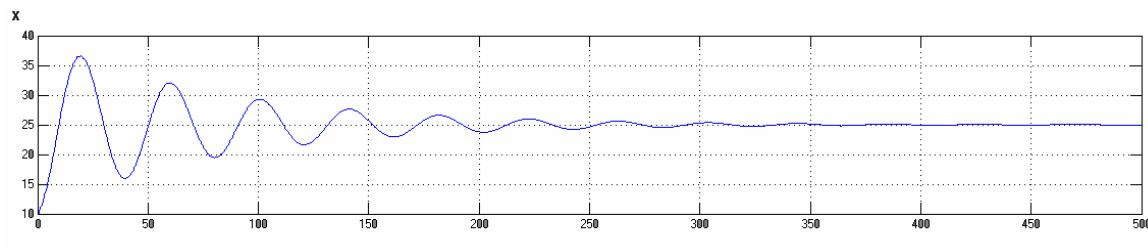


Рисунок 4 – Значение горизонтальной координаты центра тяжести ТДП (x) при значении $\beta = 15$.

При этом приращение каждого из коэффициентов ПИД-регулятора показано на рисунке 5.

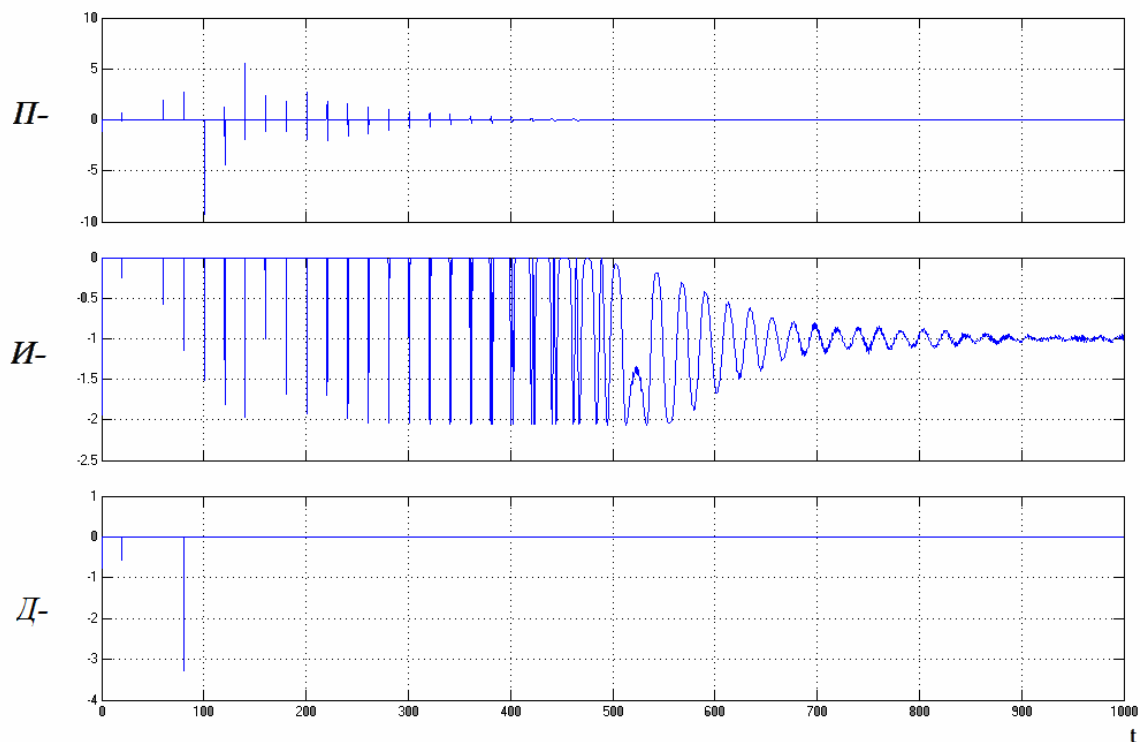


Рисунок 5 – Значения приращений коэффициентов ПИД-регулятора на отрезке $t [0, 1000]$

В то же время, исследования показали, что при определенных режимах лучше использовать адаптивный ПИ-регулятор, т.к. дифференциальная составляющая может дополнительно раскачивать систему (рисунки 6, 7):

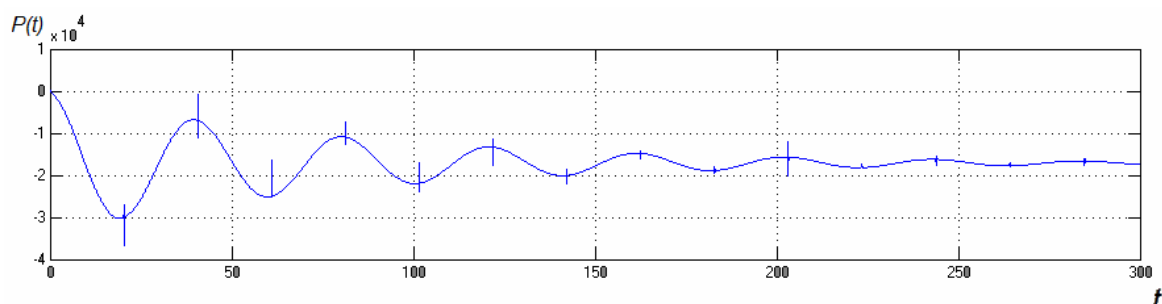


Рисунок 7 – Значения управляющей силы $P(t)$ для адаптивного ПИД-регулятора при значении $\beta = 15$

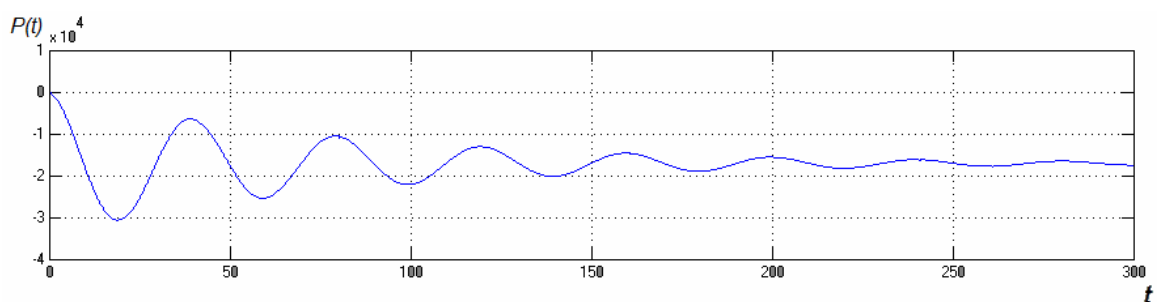


Рисунок 8 – Значения управляющей силы $P(t)$ для адаптивного ПИ-регулятора при значении $\beta = 15$

Выводы. Исследования адаптивной настройки коэффициентов ПИД-регулятора для управления ТДП показали, что наиболее предпочтительным является адаптивный ПИ-регулятор, но при этом такой регулятор не позволяет производить эффективную настройку коэффициентов из-за сложности учёта влияния всех возможных параметров на динамику управления ТДП в условиях текущей неопределенности. Дальнейшим направлением в развитии вопросов решения задач адаптивной настройки ТДП в условиях воздействия негауссовских возмущений, априорной и текущей неопределенностей может явиться включение в контур управления нейро-нечёткого регулятора, который имеет более гибкую настройку и является более предпочтительным в данной ситуации [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирия Р.В., В.Ю. Максютенко, Т.Ф. Мищенко, Б.И. Мытовой О взаимодействии насыпного груза с отбойным щитом. // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. - Днепропетровск, 2009. – Вып. 83. - С. 246-252.
2. Кирия Р.В., Богданов В.М., Мостовец Б.И. Определение скорости и угла отрыва сыпучего груза при разгрузке с барабана ленточного конвейера // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. - Днепропетровск, 2000. – Вып. 18. - С. 113-118.
3. Балев А.Е, Михалёв А.И., Кирия Р.В. Моделирование адаптивных систем управления перегрузочными узлами горнотранспортных машин // Автоматизация: проблемы, идеи, решения / Материалы международной научно-технической конференции - Севастополь, 2011. – С. 202-203.
4. Балев А.Е, Михалёв А.И., Кирия Р.В. Моделирование систем интеллектуального регулирования перегрузочными узлами горнотранспортных машин // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта / Сборник научных трудов - Евпатория, 2012. – С. 21-22.

СОДЕРЖАНИЕ

Осипов К.Н., Первухина Е.Л.

Снижение влияния погрешностей измерений на достоверность результатов приемосдаточных испытаний ДВС 3

Хорошилов С.В.

Об алгоритмическом обеспечении управления ориентацией солнечных космических электростанций. Часть 2 12

Рева В.Н.

Приближенный алгоритм решения динамической квадратичной задачи о назначении..... 25

Манько Т.А., Рыбалко А.В.

Технология создания высокопрочных конструкций для ветроэнергетики..... 31

Гавриленко Є.А., Гнатушенко В.В., Щербина В.М.

Визначення діапазонів положення нормалей у вузлах дпк з монотонною зміною кривини 43

Наумова И.Ю.

Взаимодействие пластины со сжимающими ее штампами при симметричном действии торцевых нагрузок 48

Ревенко Ю.М.

Разработка и исследование оптимальных составов СОЖ для повышения эффективности алмазного шлифования твенрдосплавных деталей вырубных штампов..... 56

Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю., Новикова Л.В.

Алгоритм управления точностью численного решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений 71

Зубов В.Л.

Выплавка ферросилиция с использованием в шихте восстановительных смесей 80

Пожидаев В.Ф., Прядко Н.С., Грачев О.В.

Метод определения среднего размера класса крупности частиц сыпучих материалов 89

Бахрушин В.Є., Дудко І.О.

Уточнення моделей нормального розподілу на основі мінімізації критерію колмогорова-смирнова..... 95

Кондратенко Ю.П., Коробко О.В.

Спеціалізована комп'ютерна система автоматичного контролю параметрів для оцінювання ефективності термоакустичних процесів 104

Клименко С.В., Лантушенко А.О.

Інформаційна технологія завадостійкості цифрового каналу зв'язку з використанням рекурентних несистематичних кодів..... 112

Матвеева М.О.

Применение планирования по схеме полного факторного эксперимента для оптимизации состава и свойств отливок из половинчатых чугунов..... 123

Козлов В.М., Хлынцев В.П., Калениченко В.В.	
Исследование влияния некогерентной нуклеации на поликристаллическую структуру гальванопокрытий.....	133
Кошулян А.В.	
Модель случайных ошибок измерений остаточных напряжений железнодорожных колес контактным ультразвуковым методом	143
Балев А.Е., Михалёв А.И., Кирия Р.В.	
Моделирование адаптивных систем управления перегрузочными узлами горнотранспортных машин	156

УДК 681,5

Осипов К.Н., Первухіна Е.Л. **Зниження впливу похибки вимірювання на достовірність результатів приймально-здавальні випробування ДВЗ** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.3 - 11.

Зниження впливу помилок вимірів на достовірність результатів приймально-здавальних випробувань ДВС досягається моделюванням залежностей між нестационарними процесами зміни значень їх діагностичних параметрів і побудовою адаптивного дискретного фільтра.

Бібл. 10.

УДК 624.046.3

Хорошилов С.В. **Про алгоритмічне забезпечення керування орієнтацією сонячних космічних електростанцій. Частина 2** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.12 - 24.

Позначено ряд важливих задач, які необхідно вирішувати при створенні системи керування орієнтацією сонячної космічної електростанції. Представлено методичне забезпечення для оцінки впливу дисипативних і пружних характеристик конструкції на стійкість об'єкта керування, аналізу спостережливості і керованості при неповному векторі стану, а також синтезу алгоритмів керування орієнтацією електростанції робастних стосовно ряду невизначеностей, що може бути основою при створенні алгоритмічного забезпечення системи керування орієнтацією електростанції.

Бібл. 13, іл. 2.

УДК 519.8

Рева В.М. **Наближений алгоритм розв'язання динамічної квадратичної задачі про призначення** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.25 - 30.

Запропоновано наближений поліноміальний по тимчасовій складності алгоритм розв'язку динамічної квадратичної задачі про призначення. Для отриманого розв'язку значення цільової функції не гірше середнього.

Бібл. 4.

УДК 678.02:621.365

Манько Т.А., Рибалко А.В. **Технологія створення високоміцних конструкцій для ветроенергетики** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.31 - 42.

Запропоновано новий метод отвердження на підставі експериментальних досліджень за допомогою інфрачервоного нагріву зразків з полімерних композиційних матеріалів на підставі поліефірного зв'язуючого, які володіють високою механічною міцністю і компактною структурою порівняно з композицією, яка отверджена традиційним методом. Даний висновок підтверджується структурним і механічним аналізом.

Бібл. 6.

УДК 515.2

Гавриленко Є.А. **Визначення діапазонів положення нормалей у вузлах ДПК з монотонною зміною кривини** / Є.А. Гавриленко, В.В. Гнатушенко, В.М. Щербина // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.43– 47.

Визначається область можливого розташування нормалей, які відповідають вихідним вузлам дискретно представленої кривої з монотонною зміною кривини.

Бібл. 2, іл. 2.

УДК 539.3

Наумова І.Ю. **Взаємодія пластини зі стискаючими її штампами за умов симетричних дій торцевих навантажень** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.48– 55.

Пропонується постановка задачі про дослідження процесу взаємодії пластини зі стискаючими її жорсткими штампами в результаті дії симетрично доданих торцевих навантажень, що однаково змінюються у часі. На основі уточненої теорії пластин отримано рішення поставленої задачі в кінцевих формулах. Проведено дослідження залежності положення границі областей зчеплення і прослизання з тертям, а також характеру взаємодії між пластиною і штампами від величини прикладаються торцевих навантажень.

Бібл. 4, іл. 5.

УДК 621.9.079

Ревенко Ю.М. **Розробка та дослідження оптимальних составів СОЖ для підвищення ефективності алмазного шліфування твєрдосплавних деталей вирубних штампів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.56– 70.

Запропоновано та теоретично обґрунтовано новий підхід до створення ефективних составів СОЖ для алмазного шліфування твердих сплавів, що базується на термодинамічному аналізі фізико-хімічних процесів, що протікають на ювенільних поверхнях. Встановлений характер впливу розробленого составу СОЖ на основні параметри даної обробки и розроблена математична модель оптимізації процесу алмазного шліфування твердого сплаву по критерію мінімальної питомої собівартості з'йому матеріалу що обробляється.

УДК 519.6:004.9

Зеленцов Д.Г., Радуть О.А., Коротка Л.І. **Аналіз застосовності аналітичних формул при розв'язанні задач довговічності стержневих кородуючих конструкцій** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.71 – 79.

У статті наводиться докладний аналіз застосовності отриманих раніше залежностей у вигляді аналітичних функцій довговічності стержневого елемента довільного перерізу, що підлягає корозійному зносу. Пропонується підхід, заснований на використанні математичного апарата теорії катастроф, за допомогою якого пояснюються особливості поведінки функцій довговічності.

УДК 669. 15-198

Зубов В.Л. **Выплавка ферросилиция с использованием в шихте восстановительных смесей** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.80 – 88.

Проанализировано и обобщено современное состояние вопроса технологии выплавки ферросилиция с вовлечением в производство восстановительных смесей взамен коксика-ореха. Приведены результаты промышленных испытаний выплавки ферросилиция марки ФС65 с использованием восстановительных смесей, содержащих наряду с коксом-орехом антрацит и длиннопламенный уголь.

Библ.9.

УДК 622.73

Пожидаев В.Ф., Прядко Н.С., Грачов О.В. **Метод визначення середнього розміру класу крупності часток сипучих матеріалів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.89 – 94.

Описано метод розрахунку середнього розміру часток при розподілі їх по класах крупності, заснований на фізичних принципах. Середній діаметр часток в інтервалі визначається як математичне очікування випадкової величини за умови влучення її в інтервал. Показано можливість і недоліки визначення величини середнього діаметра з використанням для апроксимації кумулятивної кривої модифікованого закону Вейбулла з параметрами розподілу, що одержано за результатами гранулометричного аналізу.

Отримано зручну формулу для визначення середнього діаметра суміші часток в інтервалі. По отриманій формулі середнього діаметра відновлюється функції розподілу часток по розмірах. Вирішено задачу про найкраще наближення на відрізок щільності розподілу статистичними функціями. Наближена формула розрахунку середнього діаметра випробувана для розподілу часток вугілля по класах.

Бібл. 2.

УДК 519.25

Бахрушин В.Є., Дудко І.О. **Уточнення моделей нормального розподілу на основі мінімізації критерію Колмогорова-Смирнова** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.95 – 103.

У статті розглянуто питання щодо оцінювання критичних значень критерію згоди Колмогорова-Смирнова для випадку, коли параметри моделі нормального розподілу визначаються шляхом мінімізації розрахункового значення цього критерію.

Іл.: 3. Табл.: 2. Бібл.8.

УДК 681.518.52

Кондратенко Ю.П., Коробко А.В. **Специализированная компьютерная система автоматического контроля параметров для оценки эффективности термоакустических процессов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.104 – 111.

В статье проведен анализ существующих систем контроля параметров и эффективности термоакустических процессов. В качестве критерия эффективности выбран коэффициент полезного действия. Предложены структурные и программно-аппаратные средства

реализации специализированной компьютерной системы (СКС) для мониторинга и анализа термоакустических процессов (ТАП). Приведены результаты работы системы при исследовании энергетических показателей термоакустических процессов на примере термоакустического двигателя (ТАД).

Библ. 15, ил. 4, табл. 1.

УДК 004.056(075.8)

Клименко С.В., Лантушенко А.А. **Информационная технология помехоустойчивости цифрового канала связи с использованием рекуррентных несистематических кодов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.112 – 122.

На основе анализа возможностей повышения помехоустойчивости каналов связи, разработана информационная технология использования рекуррентных несистематических кодов, которая позволяет обнаружить и исправить одиночные, двойные ошибки.

Библ.7, ил.4, табл. 2.

УДК 621.74:669.131.2:669.131.4

Матвеева М.О. **Застосування планування по схемі повного факторного експерименту для оптимізації складу і властивостей виливків з половинчастий чугунов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.123 – 132.

Вирішення задачі поєднання у чавунних виливках певного комплексу експлуатаційних властивостей, таких як зносостійкість, корозійна стійкість і жаростійкість пов'язане зі значними труднощами, так як підвищення рівня однієї властивості може викликати зниження інших або деяких з них. Для рішення такої компромісної задачі було застосовано математичне планування експерименту. Завдяки йому отримано максимальну інформацію про об'єкт дослідження (багатокомпонентний сплав) при мінімальній кількості дослідів. При цьому на об'єкт впливало багато факторів – хімічний склад сплаву, його легування та модифікування. Отриманий математичний опис впливу кожного фактору на функцію оптимізації. За результатами проведених досліджень встановлено, що комплексу необхідних властивостей відповідали сплави, що містять 6,0 % алюмінію і модифіковані комплексом $\text{Ce} + \text{TiCN} + \text{SiC}$.

УДК 669.017

Козлов В.М., Хлинцев В.П., Калениченко В.В. **Дослідження впливу некогерентної нуклеації на полікристалічну структуру гальванопокрыттів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.133 – 142.

Проведений термодинамічний аналіз стадії некогерентного зародкоутворення при електрокристалізації металів. Було виявлено вплив перенапруження кристалізації на вірогідність некогерентного зародкоутворення, що ініціює виникнення висококутових границь в покриттях. Теоретичні результати були підтверджені експериментальними даними по електроосажденню цинку на монокристал цинку.

УДК 519.24:681

Кошулян О.В. **Модель випадкових похибок вимірювань залишкових напружень залізничних коліс контактним ультразвуковим методом** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.143 – 155.

На прикладі вимірювань залишкових напружень залізничних коліс ультразвуковим контактним методом розглянута проблема вибору параметричної моделі випадкової похибки вимірювань. Показано, що розподіл ймовірностей похибки можна апроксимувати розподілом Лапласа. Застосування моделі розглянуто у задачі виявлення викидів вимірювань. Застосований підхід вибору моделі може використовуватися у випадку багатократних вимірювань однотипових об'єктів контролю.

Бібл. 7, іл. 4, табл.3.

УДК 004.942

Балєв О.Є, Михальов О.І., Кірія Р.В. **Модельювання адаптивних систем керування перевантажувальними вузлами гірничотранспортних машин** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (82). - Днепропетровск, 2012. - с.156 – 166.

Проведено дослідження адаптивного налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора які показали, що для управління трикутним дільником (ТДП) потоку найбільш кращим є адаптивний ПІ-регулятор, але при цьому такий регулятор не дозволяє проводити ефективне налаштування коефіцієнтів через складність врахування впливу всіх можливих параметрів на динаміку управління ТДП в умовах поточної невизначеності. Подальшим напрямком у розвитку питань вирішення завдань адаптивного налаштування ТДП в умовах впливу негаусовських збурень, апріорної та поточної невизначеностей може з'явитися включення в контур управління нейро-нечіткого регулятора, який має більш гнучкі параметри налаштування.

Бібл. 4, рис. 8.

UDK 681.5

Osipov K., Pervukhin E. **Reduction influence on dostovernost pohreshnostey measurement of results pryemosdatochn test to ICE** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.3 - 11.

Reduction Effect mistakes measurements on the results dostovernost pryemosdatochnykh test to ICE dostyaetsya modeling hung-bridge between nestatsyonarnymy Process Changes values s di-agnostic parameters and building a discrete adaptive filter.

Bibl. 10.

UDK 624.046.3

Khoroshilov S.V. **About algorithmic maintenance for solar space power stations attitude control. Part 2** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.12 - 24.

A series of important problems which are necessary to be solved during elaboration of attitude control system for solar power satellite is marked out. Methodical maintenance for evaluation of influence of flexible and damping characteristics on plant stability, observability and controllability analysis with not full state vector and also algorithms synthesis for solar power satellite attitude control are presented. These methodical approaches can form a basis for algorithmic maintenance creation of attitude control system for solar power satellite.

Bibl 15., ill 2.

UDK 519.8

Reva V.N. **Approximating algorithm of decision of dynamic quadratic assignment problem** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.25 - 30.

Approximate algorithm of decision of dynamic quadratic assignment problem, which has polynomial time complexity, is offered. Value of objective function on the got decision not worse of mean value.

Bibl. 4.

UDC 678.02:621.365

Manko T.A., Rybalko A.V. **Technology of creation of high-strength constructions for wind-power engineering** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.31 - 42.

The new method of hardening is offered on the basis of experimental researches by the infra-red heating standards from polymeric composition materials on the basis of polyester connective, which possess high mechanical durability and compact structure by comparison to composition which hardening by a traditional method. This conclusion is confirmed a structural and mechanical analysis.

Bibl. 6.

UDK 515.2

Gavrilenko E.A. **Determination of diapazoniv position of normals in the knots of DPK with the monotonous change of curvature** / E.A. Gavrilenko, V.V. Gnatushenko, V.M. Shcherbina // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.43 - 47.

The area|domain| of possible|possibly| location|disposition| of normals which|what| answer the initial|output| knots|gnarl| of the discretely presented|represent| curve with the monotonous change|changing| of curvature is determined.

Bibl. 2, ill. 2.

UDC 539.3

Naumova I.Y. **Interaction of plate with punches which are squeezing it in symmetric impact of end loads** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.48 - 55.

It is proposed formulation of the problem of research the interaction between a plate and compressing it hard punches from the end of the symmetrically applied loads which are equally time-varying. Based on the improved theory of plates the solution of the problem was obtained in the finite formulas. A study of the dependence of the border areas of adhesion and slipping with friction has been held, and the nature of the interaction between the plate and punches which depends from magnitude of the applied end loads.

Bibl. 4, ill. 5

UDK 621.9.079

Ravenko U.M. **Development and study of optimal composition for increased efficiency coolant diamond grinding tvenrdosplavnyh parts cutting dies** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.56 - 70.

A new approach was proposed and theoretically justified to effective compounds coolant for diamond grinding of hard metals, based on the thermodynamic analysis of physical and chemical processes on the surfaces of the juvenile. The nature of the influence of coolant was designed for the main parameters of the process and a mathematical model of optimization of diamond grinding hard alloy by the minimum unit cost of the material removal rate.

UDC 519.6:004.9

Zelentsov D.G., Radul O.A., Korotkaya L.I. **The analysis of analytical formulas applicability when solving the problems of corroding bar constructions durability** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.71 - 79.

In this article the detailed analysis of previously derived dependence applicability is carried out. It is presented in the form of the analytical functions of arbitrary cross-section bar element durability subjected to corrosive wear. With the help of the approach based on the usage of catastrophes theory mathematical apparatus the peculiarities of durability functions are explained.

UDC 669. 15-198

Zubov V.L. **Smelting ferrosilicon using a charge-reducing agent mixtures** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.80 - 88.

The current state of ferrosilicon production technology using reducing mixtures instead of coke nut was analyzed and summarized. Results of test FS65 ferrosilicon production using reducing mixtures that contain anthracite and cannel coal besides coke nut were presented.

Bibl.9.

UDK 66.096.5

Pozhidaev V., Pryadko N., Grachov O. **Method of medium-sized calculation of bulk solid particle class** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.89 - 94.

Medium-sized calculation of particles is described at their distribution on sized classes, based on physical principles. Average diameter of particles in an interval is determined as an assembly average of a random variable under condition of its hit in an interval. The opportunity and lacks of average diameter definition with use for cumulative curve approximation a modified Weibull law with the parameters of distribution determined by size test results is shown.

The convenient formula for definition of average diameter of particle mixture in an interval is received. By the received formula of average diameter it is restored functions of particle distribution in the sizes. The problem of the best approximation of distribution density in interval is solved by power functions. The approximate formula of average diameter calculation is tested for coal particles distribution on classes.

Bibl. 2.

UDC 519.25

Dudko I.O., Bakhrushin V.E. **Refinement of normal distribution models by minimizing the Kolmogorov-Smirnov criterion** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.95 – 103.

In the article it is considered the problem of critical values estimating for the Kolmogorov – Smirnov test in the case when the parameters of normal distribution model are calculated by minimization of the criterion calculated value.

Figs.: 3. Tabl.: 2. Refs.8.

UDC 681.518.52

Kondratenko Y.P., Korobko A.V. **Specialized computer system for automatic control of the parameters for thermoacoustic processes efficiency evaluation** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.104 – 111.

The existing systems of thermoacoustic process parameters and efficiency control are analyzed in the paper. The performance index is chosen as efficiency criteria. A structural, software and hardware implementation of a specialized computer system (SCS) for the monitoring and analysis of thermoacoustic processes (TAP) is given. The results of the study of thermoacoustic processes performance are held on the research thermoacoustic engine (TAE).

Ref. 15, il. 4, table. 1.

UDC 004.056(075.8)

Klimenko S.V., Lantushenko A.A. **The information technology of the digital connection inference immunity using recurrent unsystematic codes** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.112 – 122.

This research provides a developed information technology methodology to increase the probability of inference immunity by employing recurrent unsystematic codes. Such methodology allows for the discovery and correction of single and dual errors.

Bibl. 7, ill. 4, tabl.2.

UDC 621.74:669.131.2:669.131.4

Matveeva M.O. **Application for planning scheme full factorial experiment for optimization the composition and properties of casting mottled cast iron** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.123 – 132.

Solution of the problem a combination of cast iron castings in certain of the complex operating properties such as wear resistance, corrosion resistance and heat resistance involves considerable difficulties, as the increase in the level of one of the properties may cause a reduction the other, or some of them. To solve this problem a compromise was applied mathematical planning of the experiment. Owing to it get the most information about the study (multicomponent alloys) with a minimum number of experiments. In this case, the object has an effect many factors - the chemical composition of the alloy, alloying and its modification. The mathematical description of the influence of each factor on the optimization function. All this research found that the property is responsible necessary complex alloys containing 6.0% aluminum and modified complex $Ce + TiCN + SiC$.

UDC 669.017

Kozlov V.M., Khlyncev V.P., Kalenichenko V.V. **Investigation of the influence of non-coherent nucleation on polycrystalline structure of the electrodeposits** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.133 – 142.

The non-coherent nucleation step during metal electrocrystallization has been investigated by performing a thermodynamic analysis. It was determined the influence of the crystallization overvoltage on the probability of non-coherent nucleation initiating the formation of high-angle boundaries in the electrodeposits. The theoretical results were verified by the experimental findings on zinc electrodeposition on Zn single crystal.

UDC 519.24:681

Koshulyan A. **Random error model of railroad wheel stress measurement for contact ultrasonic method** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.143 – 155.

The problem of selecting the parametric model of a random error is considered in the case if residual stress measurement of a railroad wheel is performed via contact ultrasonic method. The study determined that the probability distribution of the random error could be approximated by a Laplace distribution. The use of the model is considered for the problem of outlier detection. The approach used for the model selection can be applied for similar tested objects.

Bibl. 7, ill. 4, tables 3.

UDC 004.942

Baliev A.E, Mihalyov A.I., Kiria R.V. **Simulation of adaptive management systems for overload mining transportation machines** // System technologies. N 5(82) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.156 – 166.

The research set of the coefficients of the adaptive PID have shown that the configuring of the triangular flow divider (TFD) is the most preferred adaptive PI controller, but this controller does not allow effective tuning coefficients because of the effects of all the possible parameters for the dynamics TFD configuring in the current uncertainty. Further direction in the development of problem solving issues of adaptive tuning TFD under the impact of non-

Gaussian perturbations, a priori and the current uncertainty may be the inclusion of a control loop neuro-fuzzy controller, which has a flexible configuration options.

Lit. 4, pic. 8

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Осипов К.Н. - Севастопольский национальный технический университет.

Первухина Е.Л. - Севастопольский национальный технический университет.

Хорошилов С.В. - Институт технической механики НАНУ и ГКАУ.

Рева Владимир Николаевич – к.физ.-мат.н., доцент кафедры системный анализ и управление Национального горного университета.

Манько Тамара Антоновна – д.т.н., профессор Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

Рыбалко Андрей Витальевич – аспирант Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

Гавриленко Євген Андрійович — к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладної геометрії і інформаційних технологій проектування Таврійського державного агротехнологічного університету.

Гнатушенко Володимир Володимирович — д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України.

Щербина Віктор Михайлович — к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладної геометрії і інформаційних технологій проектування Таврійського державного агротехнологічного університету.

Наумова И.Ю. – к.физ.-мат.н., доцент кафедры теоретической и строительной механики Национальной металлургической академии Украины.

Ревенко Юрий Михайлович - к.т.н., доцент каф. "Оборудование перерабатывающих и пищевых производств". Днепродзержинский государственный технический университет.

Зеленцов Дмитрий Геннадьевич – заведующий кафедрой компьютерных технологий и высшей математики Государственного высшего учебного заведения «Украинский государственный химико-технологический университет», д.т.н., профессор.

Новикова Людмила Владимировна – ассистент кафедры компьютерных технологий и высшей математики Государственного высшего учебного заведения «Украинский государственный химико-технологический университет»

Науменко Наталья Юрьевна – доц. кафедры компьютерных технологий и высшей математики Государственного высшего учебного заведения «Украинский государственный химико-технологический университет», к.т.н., доцент.

Пожидаев Виталий Федорович – Заведующий кафедрой информатики Восточно-украинского национального университета им. Даля, д.т.н.

Прядко Наталия Сергеевна – старший научный сотрудник Института технической механики НАНУ и НКА Украины, к.т.н.

Грачев Олег Владимирович – доцент кафедры «Системная инженерия» Восточно-украинского национального университета им. Даля, к.т.н.

Бахрушин Володимир Євгенович - доктор фізико-математичних наук, професор, Класичний приватний університет, м. Запоріжжя.

Дудко Іван Олександрович - аспірант, Класичний приватний університет, м. Запоріжжя.

Кондратенко Юрій Пантелійович – д.т.н., проф. кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова.

Коробко Олексій Володимирович – аспірант кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова.

Клименко Светлана Владимировна – к.т.н., доцент кафедры радиоэлектронной автоматики, физико-технического факультета, Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара

Лантушенко Алена Александровна – студентка 6 курса по специальности «Системы технической защиты информации, автоматизация ее обработки.

Козлов Валентин Михайлович – д.х.н., профессор. Национальная металлургическая академия Украины, заведующий кафедрой физики.

Хлынцев Виктор Прохорович – к.физ.-мат.н., доцент. Национальная металлургическая академия Украины, кафедра физики.

Калениченко Виктория Викторовна – старший преподаватель кафедры физики, Национальная металлургическая академия Украины.

Кошуляк Алексей Валентинович - преподаватель, физико-технический факультет Днепропетровского национального университета им. О. Гончара.

Балев А.Е. - аспирант НМетАУ.

Михалёв Александр Ильич - д.т.н., профессор, зав. кафедры ИТС, НМетАУ.

Кирия Р.В. - к.т.н., ст. научный сотрудник ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины.