УДК 53.088;519.65

А. П. Локтионов, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: loapa@mail.ru)

РЕШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ОБРАТНОЙ НАЧАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ С ЛАГРАНЖЕВОЙ АППРОКСИМАЦИЕЙ

На основе лагранжевой аппроксимации в алгоритме численного дифференцирования исследована оптимизация погрешности в обратной начальной задаче при постоянной внешней нагрузке. Оптимизация достигается регуляризацией преобразовательной агрегации датчиков.

***Ключевые слова**: обратная начальная задача, начальные условия, лагранжева аппроксимация, информационно-измерительная система, регуляризация, агрегация.*

***

Введение

В технических приложениях по сигналам датчиков решением обратной задачи вычисляют неизмеряемые входные данные расчетной схемы, уточняют начальные условия, допускающие их зависимость от внешней нагрузки [1, с. 10, 33; 2]. В работе автора [3, с. 16, 25, 278, 284] сообщалось, что в задаче экспериментально-расчетного определения деформативных характеристик элементов механических конструкций эффективно использование теории и аппарата редукции измерений, методов аппроксимации. В работе [2] показано, что редукция измерений позволила определять опорный момент консольной балки, нагруженной поперечной сосредоточенной силой, если не заданы начальные условия. Определение опорного момента балки реализовано лагранжевой аппроксимацией второй производной функции прогиба при дискретизации прогибов в четырех отсчетных точках и численном дифференцировании информационно-измерительной системой (ИИС).

В статье предлагается развитие метода, основанного на редукции измерений и лагранжевой аппроксимации для численного дифференцирования, на экспериментально-расчетное определение начального параметра объекта при равномерно распределенной нагрузке.

Под редукцией измерений понимается формализм, позволяющий по результатам измерений в наблюдаемой системе “измеряемый объект – среда – информационно-измерительная система“ получать наиболее точное описание ненаблюдаемой системы “исследуемый объект – среда“. Характеристики измеряемого объекта, в отличие от исследуемого, искажены взаимодействием с ИИС, в частности с ее измерительным компонентом (ИК), включающим датчики и канал связи, а в некоторых случаях и со средой. Алгоритм, реализуемый ИИС, в частности ее вычислительным компонентом (ВК), извлекает из выходного сигнала ИК максимально точные значения представляющих интерес целевых характеристик исследуемого объекта, не доступных для прямого изучения [3, с. 13].

Особенности обратных задач численного дифференцирования и использования аппарата редукции измерений без утраты общности рассматриваем на примере контроля силового элемента (СЭ) механической конструкции – прямоосной упругоизгибаемой консольной балки длиной l с постоянной жесткостью на изгиб EI, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью q. В СЭ измеряют прогибы, контролируют целевую характеристику СЭ – опорный момент M_0.

Цель данной работы – совершенствование полиномиальной аппроксимации непосредственно не измеряемой характеристики объекта с использованием в ИИС численного дифференцирования при лагранжевой аппроксимации с постоянным шагом и равномерной непрерывной норме абсолютной неопределенности измерений. Должны быть достигнуты предельные оптимальные соотношения в преобразовательной агрегации ИК по классу преобразования, количеству и размещению датчиков на измеряемом объекте. Цель исследований состоит в разработке критериев оценивания эффективности редукции измерений при использовании в ИИС численного дифференцирования. Прикладное значение исследований заключается в повышении точности определения характеристик СЭ.

Редукция измерений при равномерной непрерывной норме абсолютной неопределенности измерений

Повышение эффективности редукции измерений связано с оптимизацией преобразовательной агрегации ИК. Используем в ИК два класса преобразования датчиков и сигналов ИК (отсчетов прогибов y*(xi)) [4]. При p-преобразовании отсчетов сигнал канала связи – линейная функция преобразования проходит через начало координат, выполняется равномерная непрерывная норма абсолютной величины неопределённости измерений датчиками и каналом связи соотношениями

$$\left\|\Delta y\left(x_i\right)\right\| = \Delta_m\left(y\left(x_i\right)\right) = \varepsilon_p y_p \geq \geq \Delta\left(y\left(x_i\right)\right) = \left|y^*\left(x_i\right) - y\left(x_i\right)\right|, \quad (1)$$

где $\Delta_m(y(x_i))$ – верхние границы абсолютных значений неопределённости измерений отсчетов;

y_p– предел измерений, равный верхней границе $\sup|y^*(x_i)|$ на компактном наборе вещественных чисел $\{y^*(x_1), \ldots, y^*(x_n)\}$;

ε_p – приведенная неопределённость измерений;

n – количество датчиков.

При pi-преобразования отсчетов в отличие от p-преобразования вместо соотношений (1) выполняются соотношения

$$\Delta_m(y(x_i)) = \varepsilon_p y_{pi} \geq \Delta(y(x_i)), \quad (2)$$

где $y_{pi} = |y(x_i)|$ – пределы измерений.

Функция отсчетов $y^*(x)$ есть общее решение линейного дифференциального уравнения [3, с. 12, 26]. Для восстановления целевой характеристики СЭ используем обратную начальную задачу второго порядка с правой частью, представляемую функцией [5]

$$f(x) = y''(0), \quad x \in I \quad (3)$$

где y(x) – решение начальной задачи с дифференциальным уравнением

$$D^4 y = f_д(x); \quad (4)$$

I = [0, l] – отрезок задания решения при физических ограничениях на в общем случае неравномерную сетку аппроксимации вида

$$0 < a \leq x_i \leq b < l; \quad (5)$$

D^4 – стационарный дифференциальный оператор четвертого порядка;

$f_д(x) = q/EI = const$ – внешняя нагрузка в уравнении (4).

Для учета принципа Сен-Венана следует размещать датчики вне зоны опирания балки, например по [6] или [7] на отрезке [a, b], при

$$a = 0{,}05l,\ b = 0{,}95l. \quad (6)$$

Вместе с функцией f(x) в отсчеты $y^*(x_i)$ канала связи ИК преобразуется и совокупность других аргументов, характеризующих влияющие величины, в том числе относящиеся к внешней среде. Редукция измерений в ИИС включает приближение к искомой функции f(x) – получение приближенной функции $f^*(x)$ решением обратной задачи, обеспечивающей минимальное значение уровня неопределенности определения непосредственно не измеряемой целевой характеристики объекта.

Множество значений $\{y_i^*\}$ образует пространство наблюдений – конечномерное координатное эвклидово пространство измеренных отсчетов на сетке (5), что позволяет вычислять значение функции (3) с использованием лагранжевой одномерной аппроксимации первой степени [8, с. 4, 11]

$$y''(0) \approx S_n(y) = \frac{1}{l^2}\sum_{i=1}^{n} L_i y^*(x_i) \quad L_i \in R, \quad (7)$$

где L_i – лагранжевы коэффициенты; R – множество действительных чисел.

Оценивание эффективности редукции измерений

Рассмотрим процедуру использования редукции измерений при полиномиальных методах аппроксимации для численного дифференцирования (7) в терминах и обозначениях предлагаемой методики. В качестве критериев оценивания эффективности редукции измерений используем абсолютное ν_Δ и относительное ν_δ число обусловленности задачи редукции по соотношениям

$$\Delta_m(f) \le \nu_\Delta \sup \Delta_m(y), \qquad (8)$$

$$\delta_m(f) \le \nu_\delta\, \varepsilon_p, \qquad (9)$$

где $\Delta_m(f)$, $\delta_m(f)$, $\Delta_m(y)$ – соответственно верхние границы абсолютных и относительных значений неопределенности решения и измерений отсчетов.

Предельные оптимальные соотношения в преобразовательной агрегации ИК по классу преобразования, количеству и размещению датчиков на контролируемом СЭ достигаются регуляризацией агрегации с получением минимального числа обусловленности задачи редукции измерений – меры структурной погрешности задачи, используемой критерием оценивания эффективности решения задачи редукции измерений.

Регуляризация состоит в выборе класса преобразования сигналов и оптимального распределения узлов сетки аппроксимации (5).

Единой стратегии выбора оптимальных узлов сетки, гарантирующей сходимость процесса получения меры структурной погрешности задачи редукции измерений для всех непрерывных на отрезке [a, b] функций, нет [9, с. 214]. Получены отдельные частные результаты [7].

Утверждение 1. При равномерной норме аппроксимации алгебраическими многочленами для приближения функции (3), равенстве степени *m* аппроксимационного многочлена и степени функции *y*(*x*), при соотношениях (1) оптимальные узлы аппроксимационной формулы для получения абсолютной меры неопределенности решения задачи редукции – точки чебышевского альтернанса порядка *m* + 1 [3, с. 276].

Полином Чебышева степени m на отрезке [a, b] имеет чебышевский альтернанс порядка m + 1 – набор m + 1 точек, в которых полином принимает максимальное по модулю значение с последовательным чередованием знаков. В частности, для m = 1 точки альтернанса $x_1 = a$, $x_2 = b$. Для m = 2 точки альтернанса $x_1 = a$, $x_2 = (a + b)/2$, $x_3 = b$ [3, с. 276].

Особенности обратных задач численного дифференцирования и процедуры использования редукции измерений без утраты общности рассматриваем на примере функции *y*(*x*) четвертой степени с частными решениями уравнения (3.1)

$$\begin{gathered} y(x_i) = \xi_0 + \xi_1 x_i + \frac{1}{2}\xi_2 x_i^2 + \\ + \frac{1}{6}\xi_3 x_i^3 + \frac{1}{24}\xi_4 x_i^4, \\ \xi_2 = y''(0) = \frac{M_0}{EI} = \frac{1}{2} l^2 \xi_4, \\ \xi_3 = y'''(0) = -l\xi_4, \quad \xi_4 = \frac{q}{EI}, \end{gathered} \qquad (10)$$

где ξ_0, ξ_1, ξ_2, ξ_3 – начальные параметры функции *y*(*x*) в обратной начальной задаче нахождения искомой функции (3) в задаче Коши.

Для выделения параметра ξ_2, через который в измерительно-вычислительной задаче определяется искомый изгибающий момент M_0, преобразуем формулу (10) к виду

$$\begin{gathered} y(x_i) = \xi_0 + \xi_1 x_i + \xi_2 \frac{x_i^2}{2} \gamma_i, \\ \gamma_i = 1 - \frac{2x_i}{3l} + \frac{x_i^2}{6l^2}. \end{gathered} \qquad (11)$$

Рассматриваем технически реализуемые задачи, когда выполняются условия

$$|\xi_0 + \xi_1 x_i| << |y(x_i)|,$$

при которых из уравнения (11) следует приближенное равенство

$$\xi_2 \approx y(x_i) \frac{2}{x_i^2 \gamma_i}. \qquad (12)$$

Равномерное размещение трех узлов аппроксимации

На равномерной сетке (5) трех отсчетов $y(x_i)$ достаточно для определения ξ_2 из соотношений (11), если неизвестны параметры ξ_0, ξ_1 или высока погрешность их задания, известно значение параметра l. Для того, чтобы аппроксимационный многочлен вида (7) при $n = 3$ и (11) не был функцией параметров ξ_0, ξ_1, необходимо выполнить условия

$$\sum_{i=1}^{3} L_i = 0, \quad \sum_{i=1}^{3} L_i x_i = 0, \qquad 2l^2 = \sum_{i=1}^{3} L_i x_i^2 \gamma_i. \tag{13}$$

Условиям (13) удовлетворяют коэффициенты

$$L_1 = \frac{6}{K_q}\left(\alpha_{3l} - \alpha_{1l}\right), \qquad L_2 = -2L_1, \quad L_3 = L_1, \tag{14}$$

где $\alpha_{il} = \dfrac{x_i}{l}$;

$$K_q = \frac{1}{2}\left(\alpha_{3l} - \alpha_{1l}\right)\begin{bmatrix} \left(6 - 4\alpha_{1l} + \alpha_{1l}^2\right)\alpha_{1l}^2 - \\ -2\left(6 - 4\alpha_{2l} + \alpha_{2l}^2\right)\alpha_{2l}^2 + \\ +\left(6 - 4\alpha_{3l} + \alpha_{3l}^2\right)\alpha_{3l}^2 \end{bmatrix}; \tag{15}$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_3 + \alpha_1}{2}.$$

Решение (7) при $n = 3$ отвечает возмущенным исходным данным – отсчетам $y^*(x_i)$, уровню ошибок исходных данных в пределах неопределенности каждого отсчета. Суммарная абсолютная неопределённость определения ξ_2 по всем трем отсчетным точкам равна

$$\Delta\xi_2 = \frac{1}{l^2}\sum_{i=1}^{3}\left|L_i \Delta y\left(x_i\right)\right|. \tag{16}$$

Относительная неопределённость определения параметра ξ_2 равна

$$\delta\xi_2 = \frac{1}{l^2\left|\xi_2\right|}\sum_{i=1}^{3}\left|L_i \Delta y\left(x_i\right)\right|. \tag{17}$$

Теорема 1. Пусть на отрезке [*a*, *b*] три отсчета функции (11) выполняются *p*-преобразованием, причем $y_p = |y(x_3)|$. Тогда абсолютное число обусловленности задачи определения параметра ξ_2 представимо функцией

$$\nu_\Delta = \frac{24}{l^2\left|K_q\right|}\left(\alpha_{3l} - \alpha_{1l}\right), \tag{18}$$

где коэффициент K_q вычисляется по формуле (15).

Доказательство. С учетом соотношений (1) и $y_p = |y(x_3)|$ из выражения (16) получаем

$$\Delta_m\left(\xi_2\right) = \varepsilon_p\left|y\left(x_3\right)\right|\frac{1}{l^2}\sum_{i=1}^{3}\left|L_i\right|, \tag{19}$$

откуда, учитывая соотношение (8), получаем формулу

$$\nu_\Delta = \frac{1}{l^2}\sum_{i=1}^{3}\left|L_i\right|.$$

Подстановкой коэффициентов (14) в последнюю формулу получаем выражение (18).

Регуляризируем данную задачу с абсолютным числом обусловленности (18) численным методом. Результат регуляризации на (6) по утверждению 1 совпадает с чебышевским альтернансом третьего порядка – распределением узлов сетки (5) с точностью трех знаков после запятой $\alpha_{1l} = 0{,}050$, $\alpha_{2l} = 0{,}500$, $\alpha_{3l} = 0{,}950$, абсолютная мера структурной погрешности задачи $(\nu_\Delta)_{min} = 69{,}6/l^2$.

Теорема 2. Пусть на участке [a, b] три отсчета функции (11) выполняются p-преобразованием, причем $y_p = |y(x_3)|$. Тогда относительное число обусловленности задачи определения параметра ξ_2 представимо функцией

$$\nu_\delta = \frac{2}{\left|K_q\right|}\alpha_{3l}^2\left(6 - 4\alpha_{3l} + \alpha_{3l}^2\right)\left(\alpha_{3l} - \alpha_{1l}\right), \tag{20}$$

где коэффициент K_q вычисляется по формуле (15).

Доказательство. Подставляем выражение (12) в формулу (17) при $x_i = x_3$, получаем выражение

$$\delta\xi_2 \approx \frac{1}{2}\alpha_{3l}^2\gamma_3\left(\sum_{i=1}^{3} L_i \Delta y\left(x_i\right) / y\left(x_3\right)\right),$$

откуда с учетом соотношений (1) и (19) получаем:

$$\delta_m\left(\xi_2\right)=\frac{1}{2}\varepsilon_p\alpha_{3l}^2\gamma_3\left(\sum_{i=1}^{3}\left|L_i\right|\right).$$

Далее, с учетом соотношения (9) получаем формулу

$$\nu_\delta=\frac{1}{2}\alpha_{3l}^2\gamma_3\left(\sum_{i=1}^{3}\left|L_i\right|\right). \qquad (21)$$

Подстановкой коэффициентов (14) в формулу (21) получаем выражение (20).

Регуляризируем данную задачу с относительным числом обусловленности (20) численным методом. Результат регуляризации – оптимальные координаты узлов с точностью трех знаков после запятой α_{1l} = 0,050, α_{2l} = 0,250, α_{3l} = 0,450, относительная мера структурной погрешности $(\nu_\delta)_{\min}$ = 13,1 (рис. 1 а). Без регуляризации, например, при α_{1l} = 0,15 относительное число обусловленности задачи превышает значение 24.

Теорема 3. Пусть на участке [*a*, *b*] три отсчета функции (11) выполняются *pi*-преобразованием. Тогда приведенное абсолютное число обусловленности задачи определения параметра ξ_2 представимо функцией

$$\nu_\Delta=\frac{\sum_{i=1}^{3}\left|L_i\alpha_{il}^2\left(6-4\alpha_{il}+\alpha_{il}^2\right)\right|}{l^2\alpha_{3l}^2\left(6-4\alpha_{3l}+\alpha_{3l}^2\right)}. \qquad (22)$$

Доказательство. С учетом соотношений (2), (16) и $y_{pi}=|y(x_i)|$ получаем

$$\Delta_m\left(\xi_2\right)=\frac{\varepsilon_p}{l^2}\sum_{i=1}^{3}\left|L_i y\left(x_i\right)\right|.$$

По выражению (12)

$$y\left(x_i\right)\approx\frac{x_i^2\gamma_i}{x_3^2\gamma_3}y\left(x_3\right),$$

следовательно,

$$\Delta_m\left(\xi_2\right)=\frac{\varepsilon_p\left|y\left(x_3\right)\right|\sum_{i=1}^{3}\left|L_i\alpha_{il}^2\gamma_i\right|}{l^2\alpha_{3l}^2\gamma_3}, \qquad (23)$$

откуда по соотношению (8) получаем формулу (22).

Подставляем коэффициенты (14) в формулу (22) и регуляризируем данную задачу численным методом. Результат регуляризации при (6) по утверждению 1 совпадает с чебышевским альтернансом третьего порядка – распределение узлов сетки (5) с точностью трех знаков после запятой α_{1l} = 0,050, α_{2l} = 0,500, α_{3l} = 0,950, абсолютная мера структурной погрешности $(\nu_\Delta)_{\min} = 30{,}7/l^2$.

Теорема 4. Пусть на отрезке [*a*, *b*] три отсчета функции (11) выполняются *pi*-преобразованием. Тогда относительное число обусловленности измерительно-вычислительной задачи определения параметра ξ_2 представимо функцией

$$\nu_\delta=\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{3}\left|L_i\alpha_{il}^2\left(6-4\alpha_{il}+\alpha_{il}^2\right)\right|. \qquad (24)$$

Доказательство. Подставляем выражение (12) в формулу (17) – получаем выражение

$$\delta\xi_2\approx\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{3}L_ш\alpha_{il}^2\left(6-4\alpha_{il}+\alpha_{il}^2\right)\frac{\Delta y\left(x_i\right)}{y\left(x_i\right)},$$

откуда с учетом соотношения (2) получаем:

$$\delta_m\left(\xi_2\right)=\frac{\varepsilon_p}{12}\sum_{i=1}^{3}\left|L_i\alpha_{il}^2\left(6-4\alpha_{il}+\alpha_{il}^2\right)\right|.$$

Далее, с учетом соотношения (9) получаем формулу (24).

Подставляем коэффициенты (14) в формулу (24) и регуляризируем данную задачу численным методом. Результат регуляризации – оптимальные координаты узлов с точностью трех знаков после запятой α_{1l} = 0,050, α_{2l} = 0,259, α_{3l} = 0,468, относительная мера структурной погрешности $(\nu_\delta)_{\min}$ = 5,63 (рис. 1 б). Если в (6) *a* > 0,15*l*, то относительная мера превышает значение 11.

Заключение

Сопоставление исследованных в данной работе измерительных агрегаций с тремя датчиками, когда не заданы параметры ξ_0 и ξ_1, а также с одним датчиком при заданных значениях параметров ξ_0 и ξ_1 [10], при заданном значении параметра ξ_0 ([11] и [12]) при заданном значении параметра ξ_1 ([10] и [12]) приведены в таблице.

Сравнение измерительных агрегаций для параметра ξ_2

Заданные начальные параметры ξ_0, ξ_1	–				ξ_0				ξ_1				ξ_0, ξ_1	
Вид преобразования отсчетов	p		pi		p		pi		p		pi		p	
Вид меры структурной погрешности задачи редукции	M_Δ	M_δ	M_Δ	M_δ	M_Δ	M_δ	M_Δ	M_δ	M_Δ	M_δ	M_Δ	M_δ	M_Δ	M_δ
Значение меры	70	13	31	5,6	36	6,0	5,2	1,2	8,6	2,0	4,3	1,0	4,3	1,0

В таблице обозначено: $M_\Delta = l^2(\nu_\Delta)_{\min}$, $M_\delta = (\nu_\delta)_{\min}$.

Выводы

Получена методика выбора измерительных агрегаций с учетом требуемого уровня неопределённости искомой функции при известных ограничениях на характеристики датчиков и начальные параметры решения начальной задачи.

Предлагаемая методика позволяет принимать решение об использовании сравнительно простых измерительных агрегаций с классом *p*-преобразования датчиков и сигналов ИК или для понижения значения минимального числа обусловленности задачи использовать более сложные в реализации агрегации с *pi*-преобразованием датчиков и сигналов ИК.

Список литературы

1. Локтионов А. П. Обзор и анализ способов и устройств измерения поперечной изгибной нагрузки на элементы шасси / Курск. политехн. ин-т. – Курск, 1991. – 45 с. – Деп. в ЦНТИ ГА 15.09.91, № 835-га91.

2. Локтионов А. П. Экспериментально-расчетный метод определения опорного момента консольной балки // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 2. – С. 15–19.

3. Локтионов А. П. Структурная регуляризация подсистемы преобразовательного компонента преобразовательно-вычислительных систем. – Курск, 2009. – 323 с.

4. Локтионов А. П. Регуляризация решетчатой временной функции сигнала канала связи // Телекоммуникации. – 2010. – № 8. – С. 2–7.

5. Локтионов А. П., Максимов Ю. А., Титов В. С. О численном дифференцировании в обратной задаче Коши // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: региональный сборник научных тр. – Вып. 4. – Курск, 2002. – С. 263–268.

6. Локтионов А. П. Модель исследования внутренних силовых факторов в элементах конструкций по прогибам // Известия вузов. Строительство. – 2006. – № 7. – С. 93–98.

7. Локтионов А. П. Принцип построения системы управления исследованиями и испытаниями механических конструкций на основе редукции преобразований // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 6. – С. 57–61.

8. Локтионов А. П. О численном дифференцировании при полиномиальном приближении / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 1999. – 28 с. – Деп. в ВИНИТИ 28.06.99, № 2080-В99.

9. Бабенко К. И. Основы численного анализа. – М.-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 848 с.

10. Локтионов А. П. Об учете начальных условий в обратной начальной задаче при постоянной внешней нагрузке // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление,

вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – № 1. – С. 181–186.

11. Локтионов А. П. О полиномиальной аппроксимации в обратной начальной задаче при постоянной внешней нагрузке // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – № 1. – С. 48–52.

12. Локтионов А.П. О численном дифференцировании при постоянной внешней нагрузке и с *pi*-преобразованием входных данных // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – № 1. – С. 133–137.

Получено 13.01.16

A. P. Loktionov, Doctor of Sciences, Southwest State University (Kursk) (e-mail: loapa@mail.ru)

INFORMATION-MEASURING SYSTEM, DECISION OF REVERSE INITIAL PROBLEM WITH THE LAGRANGE APPROXIMANTS

On the basis of the Lagrangian approximation for the numerical differentiation we investigated the optimization of the error in the reverse problem at constant external load. Optimization is achieved by regularization aggregation sensors.

Key words: *inverse problem, the initial conditions, Lagrangian approximation, information-measuring system, regularization, aggregation.*

УДК 621.762.27

Е.В. Агеев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: ageev_ev@mail.ru)

А.А. Горохов, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: disclos@yandex.ru)

А.Ю. Алтухов, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: alt997@yandex.ru)

А.В. Щербаков, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: oooru46@mail.ru)

С.В. Хардиков, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: hardikov1990@mail.ru)

РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНЫЙ МИКРОАНАЛИЗ НИХРОМОВОГО ПОРОШКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В СРЕДЕ КЕРОСИНА

Представлены результаты рентгеноспектрального микроанализа порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов нихрома марки Х15Н60 в керосине осветительном. Установлено, что основными элементами в порошке, полученном методом электроэрозионного диспергирования отходов нихрома марки Х15Н60 в керосине осветительном, являются никель, хром и углерод.

Ключевые слова: *отходы нихрома, электроэрозионное диспергирование, порошок, рентгено-спектральный микроанализ.*

***

Введение

История нихрома началась в 1905-ом году. Сплав изобрел Альберт Марш. Ученый из США запатентовал одну формулу. Сейчас же существует около 10-ти вариантов рецептуры, поэтому понятие «нихром» разрослось до обозначения не одного, а группы сплавов.

Альберт Марш соединил когда-то около 80% никеля и 20% хрома. В формулах, составленных позже, первого элемента может быть от 55%, а второго – от 15%. В качестве примесей добавляют алюминий, железо, марганец, кремний, молибден, титан. В первом в истории варианте смеси лигатуры не было.