

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 621.3.066.6

В.Н. Чижов, А.А. Болтенков, О.Г. Бельчикова, М.В. Селивёрстов
V.N. Chizhov, A.A. Boltenkov, O.G. Belchikova, M.V. Seliverstov

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ «ЭЛЕКТРОД-ДЕТАЛЬ» ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ДИСКОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

MONITORING THE TEMPERATURE OF THE CONTACT SURFACE "ELECTRODE-PART" WHEN RESTORING DISK CUTTING EDGE OF TILLAGE IMPLEMENTS

Ключевые слова: передаточная функция, интеллектуальный датчик, температура контактной поверхности, калибровочный коэффициент, электрический контакт, режущая кромка, диск, электромеханическое деформирование, пластическая деформация.

Технология электромеханической обработки является актуальным направлением в области восстановления и упрочнения деталей машин и в настоящее время находит широкое применение и развитие. Одним из конкретных примеров является восстановление режущей способности рабочих органов почвообрабатывающей техники с помощью термомеханического деформирования. Основное влияние на качество восстановленных деталей при реализации этого способа оказывает температура контактной поверхности «формирующий электрод-деталь», которая лишь до заданного предела должна превышать температуру рекристаллизации материала детали. Для осуществления контроля и управления технологическими процессами восстановления деталей, основанными на электроконтактном нагреве, целесообразно применение интеллектуальных методов управления и обработки информации с помощью интегральных микропроцессорных

датчиков. Разработана схематизация процесса электроконтактного нагрева системы «формирующий электрод-деталь-теплоотводящая масса», которая позволяет осуществить переход от модели электроконтактного нагрева системы «формирующий электрод-деталь-теплоотводящая масса» к рассмотрению теплопередачи в тонком составном стержне, составленном из материалов электрода и детали. При упрощающих предположениях рассмотрена общая математическая модель процесса прямого электронагрева одного элемента симметричного контактного соединения совместно с поверхностным нагревом теплом, выделенным на переходном электрическом сопротивлении контакта. Для определения мультипликативного и аддитивного калибровочных коэффициентов k_1 и k_2 предложено использование аналитических решений линейных краевых задач теплопроводности с последующим уточнением на экспериментальном стенде. Для эффективного использования интеллектуальной системы контроля и управления технологическим процессом необходимо использовать силовой трансформатор с возможностью переключения напряжений первичной или вторичной обмотки.

Keywords: *transfer function, smart sensor, contact surface temperature, calibration factor, electrical contact, cutting edge, disk, electromechanical deformation, plastic deformation.*

The technology of electromechanical processing is a topical direction in the field of restoration and hardening of machine parts and is now widely used and developed. A specific example is the restoration of the cutting ability of the working tools of tillage implements by thermo-mechanical deformation. The main effect on the quality of the parts restored by this method is exerted by the temperature of the contact surface "forming electrode – part"; this temperature may exceed the recrystallization temperature of the part material to a certain limit only. To monitor and control the technological processes of part restoration by electric resistance heating, it is advisable to use smart techniques of control and information processing by using integrated smart sensors. The

process of electric resistance heating of the system "forming electrode – part – heat-eliminating material" is schematized; this enables to make the transition from the model of electric resistance heating of the system "forming electrode – part – heat-eliminating material" to heat transfer in a thin composite rod made of electrode and part materials. Under simplifying assumptions, a general mathematical model of the process of direct electric heating of one element of a symmetrical contact joint together with surface heating by the heat generated on the transient electrical resistance of the contact is considered. To determine the multiplicative and additive calibration factors k_1 and k_2 , it is proposed to use analytical solutions of linear boundary value problems of heat conduction with subsequent adjustment on the test bench. To efficiently use the smart control system of the process, a control power transformer for primary and secondary voltage selection should be used.

Чижов Василий Николаевич, к.т.н., проф., ректор, Алтайский институт повышения квалификации руководителей и специалистов агропромышленного комплекса, г. Барнаул. Тел.: (3852) 48-26-62. E-mail: aipk.apk@list.ru.

Болтенков Андрей Анатольевич, к.т.н., доцент, декан фак-та заочного образования, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 20-08-92. E-mail: Boltenkov_A@mail.ru.

Бельчикова Ольга Геннадиевна, к.т.н. доцент, каф. «Математика», зам. декана инженерного фак-та, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 22-33-59. E-mail: belchikova@yahoo.com.

Селивёрстов Максим Владимирович, ст. преп., каф. «Механизация производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: Seliv-Maks@yandex.ru.

Chizhov Vasily Nikolayevich, Cand. Tech. Sci., Prof., Rector, Altai Institute of Professional Development of Managers and Specialists of Agricultural Industry Complex, Barnaul. Ph.: (3852) 48-26-62. E-mail: aipk.apk@list.ru.

Boltenkov Andrey Anatolyevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Dean, Dept. of Extramural Education, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 20-08-92. E-mail: Boltenkov_A@mail.ru.

Belchikova Olga Gennadiyevna, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Mathematics, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 22-33-59. E-mail: belchikova@yahoo.com.

Seliverstov Maksim Vladimirovich, Asst. Prof., Chair of Agricultural Production and Processing Mechanization, Altai State Agricultural University. E-mail: Seliv-Maks@yandex.ru.

Введение

Технология электромеханической обработки является актуальным направлением в области восстановления и упрочнения деталей машин и в настоящее время находит широкое применение и развитие [1].

Одним из конкретных примеров является восстановление режущей способности рабочих органов почвообрабатывающей техники с помощью термомеханического деформирования, достигаемого путём электроконтактного нагрева рабочей кромки изношенных деталей до температуры пластической деформации, например, деталей типа диск (рис. 1) [2].

Основное влияние на качество восстановленных деталей при реализации этого способа оказывает температура контактной поверхности

«формирующий электрод-деталь», которая лишь до заданного предела должна превышать температуру рекристаллизации материала детали [3].

Для осуществления контроля и управления технологическими процессами восстановления деталей, основанными на электроконтактном нагреве, целесообразно применение интеллектуальных методов управления и обработки информации с помощью интегральных микропроцессорных датчиков [4]. Технологическая гибкость (настройка микропроцессорного датчика на технологический процесс восстановления конкретной детали) достигается разработкой и программированием на микроконтроллере передаточной функции датчика и хранения в энергонезависимой памяти интеллектуальной системы оперативной и ретроспективной информации.

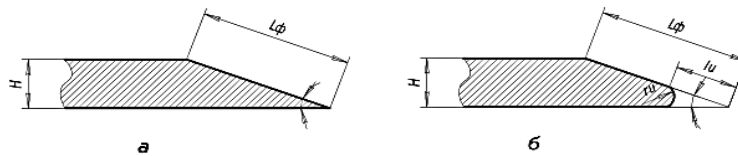


Рис. 1. Поперечный разрез диска сошника сеялки: а – новое лезвие; б – изношенное лезвие

В работе [5] сформирована передаточная функция интеллектуального датчика, преобразующего измеренную температуру открытой поверхности электрода в температуру практически недоступной для прямого измерения контактной поверхности электрического контакта, содержащая два калибровочных коэффициента (k_1 , k_2), для определения которых предложено использовать две реперные точки – точку достижения контактной поверхностью температуры рекристаллизации и точку плавления материала детали.

Этот способ связан с проведением трудоёмких натуральных экспериментов. Рассматривается способ калибровки передаточной функции интеллектуального датчика, в котором в качестве калибровочной характеристики используется упрощённое аналитическое решение задачи теплопереноса через электрод от тепловыделяющей поверхности контакта «формирующий электрод-деталь» к тепловоспринимающей открытой поверхности электрода, доступной для прямого измерения температуры [6, 7].

Схематизация процесса электроконтактного нагрева системы «Формирующий электрод-деталь-теплоотводящая масса». Рас-

сматриваемая ЭКН-технология заключается в следующем. Изношенная деталь – диск 2 (рис. 2) помещается между опорной теплоотводящей массой 3 и формирующим электродом 1, к которому приложено формирующее усилие F_1 . Активная нагрузка вторичной цепи понижающего трансформатора 4 (рис. 3), являющегося частью экспериментальной или промышленной установки, представляет собой последовательно соединённые активные сопротивления формирующего электрода R_1 , контакта $R_2=R_k$ и детали R_3 (элементы 1, 2, 3, рис. 3).

Площадь контакта пары «формирующий электрод-деталь» (контактная поверхность) значительно меньше всей скошенной поверхности режущей кромки, и, кроме того, здесь присутствуют две различные величины усилия F_1 и F_2 ($F_1 \leq F_2$). Поэтому весь процесс целесообразно разделить на две стадии: статическую (подготовительную), на которой осуществляется нагрев подэлектродной части детали до температуры, обеспечивающей пластическую деформацию кромки материала детали при $F=F_1$, и динамическую деформацию материала кромки с заданной угловой скоростью вращения диска.

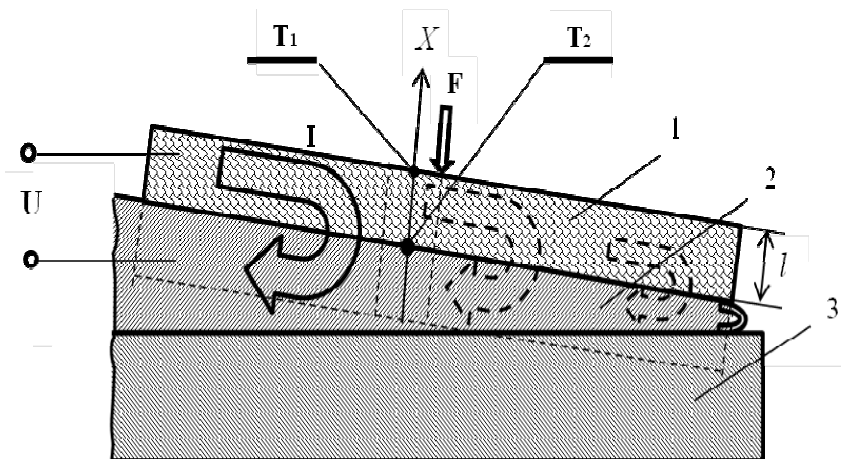


Рис. 2. Схема процесса восстановления режущей кромки

Скорость вращения диска определяется из условия превышения средней температуры подэлектродной кромки детали до температуры рекристаллизации к моменту завершения статической стадии нагрева, вычисленной или табулированной на микроконтроллере при $F=F_2$. Критерием завершения нагрева материала кромки восстанавливаемого диска в статическом режиме может служить достижение температуры рекристаллизации материала детали в области контакта «деталь-теплоотводящая опорная масса» по всей ширине формирующего электрода.

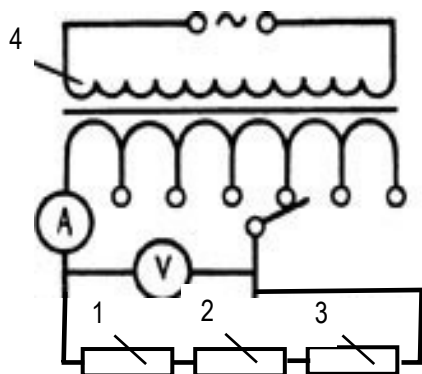


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема замещения установки

Значение F_1 выбирается из условия максимума переходного контактного сопротивления $R_2=R_k$ и, соответственно джоулева тепловыделения, а F_2 – из условия деформирования материала до формирования острого лезвия. При этом двухпозиционное управление процессом может осуществляться изменением тока $I=I_1$ в статической стадии на $I=I_2$ в динамической при неизменном усилии F .

При напряжении на вторичной обмотки понижающего трансформатора $U \approx 1,23$ В и токе $I \approx 1000$ А первая стадия завершается за несколько секунд. Поэтому теплоотдачей с открытой поверхности формирующего электрода можно пренебречь. Кроме того, будем считать, что выделенная на контактной поверхности теплота распределена по всей поверхности равномерно и приблизительно в равных частях отводится в электрод и деталь.

Эти упрощающие предположения позволяют осуществить переход от модели электродконтакт-

ного нагрева системы «формирующий электрод-деталь-теплоотводящая масса» к рассмотрению теплопередачи в тонком составном стержне, составленном из материалов электрода и детали (рис. 2).

Осуществление технологического процесса. Включается система охлаждения установки и силового трансформатора. Затем включается интеллектуальный датчик температуры контактной поверхности (ИД ТКП, рис. 4), в энергонезависимой памяти которого предварительно задаётся набранная на персональном компьютере ПК пороговая температура $T_{max}=T_{рек}+\Delta T$ (ΔT – заданное превышение пороговой температуры над температурой рекристаллизации материала диска). После этого включается силовой трансформатор 4 (рис. 3) и происходит нагрев элементов группы «формирующий электрод-деталь-теплоотводящая масса» в статическом режиме за счёт мощности, выделенной на активных сопротивлениях 1-3.

По достижении в металле детали пороговой температуры срабатывает реле включения электродвигателя для вращения диска и опорной теплоотводящей массы под формирующим электродом с заданной угловой скоростью.

Доведенная до пластического состояния кромка диска в результате нагрева детали принимает заострённую форму, на завершающей стадии процесса производится отключение силового трансформатора и остановка двигателя вращения заготовки.

Сразу после выключения силового трансформатора снимается давление с формирующего электрода, и он возвращается в исходное положение.

Усилие F_1 вычисляется до начала эксперимента, затем осуществляется контроль в реальном масштабе времени температуры контактной поверхности. В процессе нагрева до заданной температуры контактной поверхности «формирующий электрод-деталь» вычисляются усилие F_2 и угловая скорость вращения диска, а также осуществляется переход во вторую стадию – динамическую (при постоянном усилии пересчёту подлежит ток I). График зависимости тока вторичной обмотки трансформатора от времени может иметь, например, вид, представленный на рисунке 5.

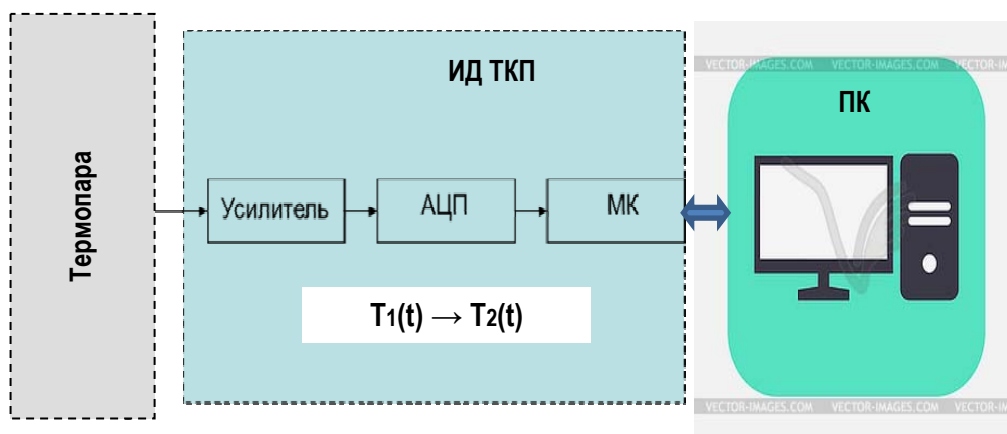


Рис. 4. Схема информационного обмена интеллектуального датчика температуры контактной поверхности с компьютером

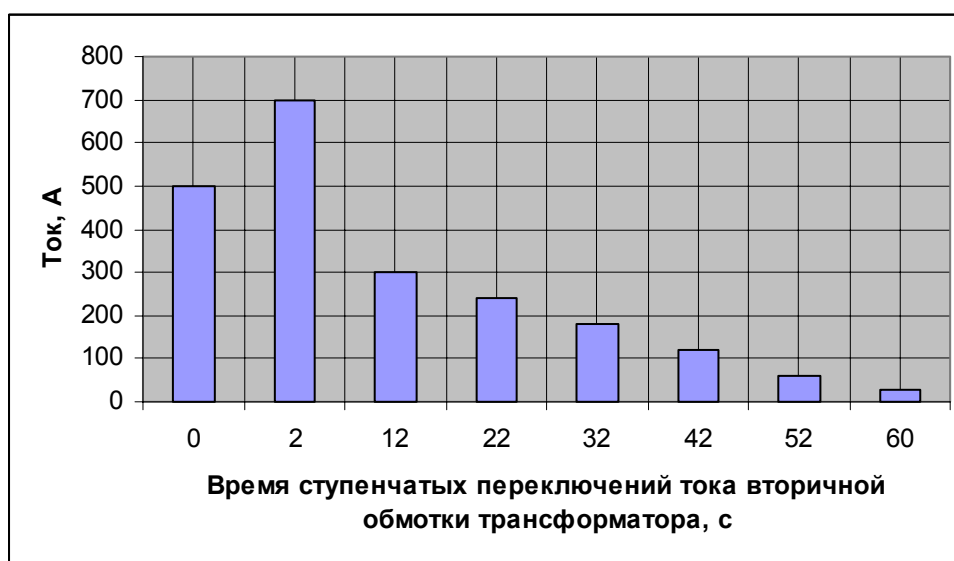


Рис. 5. График зависимости тока вторичной обмотки от времени

Калибровка передаточной функции интеллектуального датчика. Следуя подходу, представленному в работе [5], выделим в формулирующем электроде тонкий стержень (рис. 2) из материала электрода 1, подверженный одновременно прямому электронагреву на сопротивлении R_1 (объемные источники) и нагреву теплотой, выделенной на переходном контактном сопротивлении R_k под действием тока I и усилия нажатия $F=F_1$ (поверхностные источники).

Будем считать, что объемные тепловые источники w постоянны (от времени не зависят) и распределены равномерно (т.е. от пространственных координат также не зависят), зависят только от сопротивления материала электрода при средней температуре процесса нагрева $\frac{T_1(0) + T_{\max}}{2}$ и

величины протекающего тока I , как от параметра, и определяются по формуле (1):

$$w = \frac{I^2 \rho_0 \left(1 + \alpha \frac{T_1(0) + T_{\max}}{2} \right)}{S_1^2}, \quad (1)$$

$$q_1 = \frac{I^2 R_k}{2k_{\text{ПП}} S_2}, \quad (2)$$

где T – начальное значение температуры контактной поверхности;

I – ток;

ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала электрода при температуре 0°C ;

α – температурный коэффициент удельного сопротивления;

$S_1 = a_э \cdot b$ – площадь пятна контакта (кажущаяся площадь контактной поверхности);

a_3 – длина образующей конической поверхности;

b – ширина равнобедренной трапеции контактного пятна прямоугольника;

T_{\max} – максимальная температура нагрева контактной поверхности на первой стадии;

α – температурный коэффициент сопротивления материала электрода;

I – среднее значение тока вторичной обмотки на первой стадии нагрева (на первой стадии процесса восстановления в статическом режиме).

По формуле (2) определяется равномерно распределённая по средней площади контактной поверхности $S_2 = k_{\text{ИП}} a_3 \times b$ ($k_{\text{ИП}}$ – коэффициент приведения к фактической площади контактной поверхности) удельная мощность, выделенная на контактом сопротивлении R_k .

При заданных величинах физических факторов w и q_1 температура $T(x, t)$ электрода определяется решением задачи (3), где l – толщина электрода; λ – коэффициент теплопроводности материала электрода; c – удельная теплоёмкость; γ – плотность; $\hat{T}_1(t)$ – измеренная температура доступной для прямых измерений открытой поверхности электрода; T_0 – начальная температура.

$$\left. \begin{aligned} c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + w, \quad 0 < x < l, \quad t > 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= q_1, \quad x = 0, \quad t > 0 \\ T(l, t) &= \hat{T}_1(t), \quad x = l, \quad t > 0 \\ T &= T_0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad t = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} T(x, t) &= T_w(x, t) + T_q(x, t) \\ \hat{T}_1(t) &= \hat{T}_{w,1}(t) + \hat{T}_{q,1}(t) \\ \hat{T}_2(t) &= \hat{T}_{w,2}(t) + \hat{T}_{q,2}(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где \hat{T} – измеренная температура.

С помощью обозначений (4) осуществляется переход от задачи (3) к последовательному решению двух модельных задач (5) и (6).

$$\left. \begin{aligned} c\gamma \frac{\partial T_w}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + w, \quad 0 < x < l, \quad t > 0 \\ \frac{\partial T_w}{\partial x} &= 0, \quad x = 0, \quad t > 0 \\ T_w = \hat{T}_{w,1} &= 0, \quad x = l, \quad t > 0 \\ T_w &= 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad t = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} c\gamma \frac{\partial T_q}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial^2 T_q}{\partial x^2}, \quad 0 < x < l, \quad t > 0 \\ -\lambda \frac{\partial T_q}{\partial x} &= q_1, \quad x = 0, \quad t > 0 \\ T(l, t) &= \hat{T}_{q,1}(t) = \hat{T}_1(t), \quad x = l, \quad t > 0 \\ T &= T_0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad t = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Замена в задаче (5) граничного условия при $x = l$ на адиабатическое условие и преобразование аналитического решения задачи (6) позволяют для больших значений $t > \frac{cl^2}{2\lambda}$ получить, согласно обозначениям (4), слагаемые передаточной функции ИД ТКП (7) и (8):

$$\hat{T}_{w,2}(t) = \frac{I^2 \rho_0 \left(1 + \alpha \frac{T_1(0) + T_{\max}}{2} \right)}{c\gamma S_1^2} t, \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{T}_{q,2}(t) &= \Phi(t) \hat{T}_1(t) + [1 - \Phi(t)] T_0 \\ \Phi(t) &= 1 / \left(1 - 1/2 / (\lambda c^{-1} l^2 t + 1/3) \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

и записать передаточную функцию в виде:

$$\hat{T}_2(t^{(k)}) = k_1 \left\{ \Phi(t^{(k)}) \hat{T}_1(t^{(k)}) + [1 - \Phi(t^{(k)})] T_0 + \frac{I^2 \rho_0 \left(1 + \alpha \frac{T_1(0) + T_{\max}}{2} \right)}{c\gamma S_1^2} t \right\} + k_2. \quad (9)$$

Калибровочные коэффициенты k_1 и k_2 , введённые для компенсации мультипликативной и аддитивной погрешностей измерений, определяются с использованием аналитического решения задачи (5):

$$T_w(0, t) = \hat{T}_{w,2}(t) = \frac{2w}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t e^{-\left(\frac{\lambda}{c\gamma} \frac{\pi^2(2n-1)^2}{4l^2}\right)(t-\tau)} \times \left\{ \int_0^l \cos\left(\frac{\pi(2n-1)}{2l} \xi\right) d\xi \right\} d\tau. \quad (10)$$

Таблица

Исходные данные

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
1	Толщина электрода	l	0,002828	м
2	Теплопроводность	λ	18	Вт/(м·°С)
3	Уд. теплоёмкость	c	4,00E+02	Дж/(кг·°С)
4	Плотность	γ	10000	кг/м ³
5	Ток	I	1000	А
6	Температурный коэффициент сопротивления	α	0,005	1/°С
7	Уд. сопротивление	R_0	1,3E-07	Ом·м
8	Начальная температура	T_0	2,00E+01	°С
9	Пороговая температура	T_{max}	6,00E+02	°С
10	Площадь токоведущего сечения электрода	S_1	0,000008	м ²
11	Фактическая площадь контактной поверхности	S_2	0,000004	м ²
12	Контактное сопротивление		1,23E-03	Ом

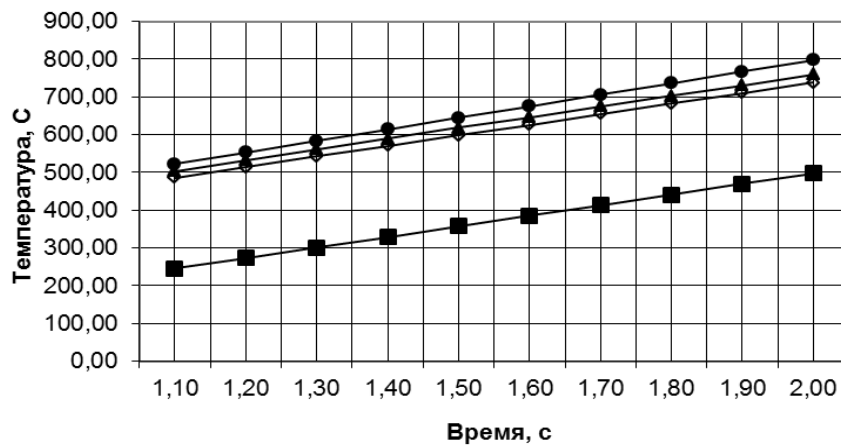


Рис. 6. Результаты численного эксперимента

Решение найдено методом разделения переменных (формула (11), [7]) с использованием разложения в ряд Фурье по косинусам (12):

$$T_w(x, t) = X_n(x)T_n(t), \quad (11)$$

$$X_n(x) = \cos\left[0,5\pi(2n-1)x/l\right]. \quad (12)$$

Для определения калибровочных коэффициентов был проведен численный эксперимент (рис. 5). Исходные данные для расчёта температуры контактной поверхности электрода с размерами $0,02 \times 0,02 \times 0,002828$ из композиционного материала (электрокерамики) с заданными тепло- и электрофизическими характеристиками приведены в таблице.

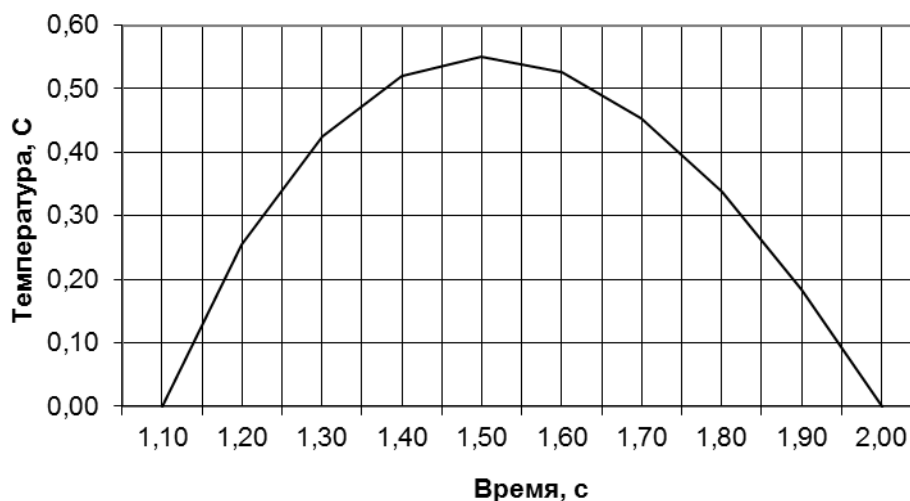


Рис. 7. Динамическая погрешность измерений ИД ТКП

На рисунке 6 показаны результаты вычисления температуры контактной поверхности в статическом режиме на стадии нагрева модельного стержня полинейному закону (в данном случае $t > 1c$). Обозначения: ■ – модель измеренной температуры открытой поверхности электрода, ● – вычисления температуры контактной поверхности по формуле (9) без калибровочных коэффициентов ($k_1 = 1, k_2 = 0$), ◇ – вычисления температуры контактной поверхности, выполненные без учёта нагрева электрода внутренними источниками теплоты; ▲ – вычисления по формуле (9) с калибровочными коэффициентами $k_1 = 0,9$ и $k_2 = 89$; полученными с учётом аналитического решения (10). В качестве реперных точек использовались значения температуры в точках $t = 1,1 c$ и $t = 2 c$.

Как видно из рисунка 7, динамическая погрешность измерений датчика ИД ТКП с передаточной функцией (9) и калибровочными коэффициентами $k_1 = 0,9$ и $k_2 = 89$ на интервале времени от $t = 1,1 c$ до $t = 2 c$ не превосходит $0,6^\circ C$.

В результате проведения контроля температуры контактной поверхности в режиме динамического мониторинга на интервале $1,1 \div 2,0 c$ по методике [8] получено время завершения первой стадии восстановления режущей кромки (статического режима) $2,5 c$.

Заключение

Для двухпозиционного управления технологическим процессом восстановления режущей кромки дисковых деталей почвообрабатывающих машин электромеханическим деформированием, основанным на электроконтактном нагреве изношенного участка диска и последующей пластической деформации режущей кромки до формирования острого лезвия, проведён отдельный анализ процессов нагрева формирующего электрода системы «формирующий электрод-деталь-теплоотводящая масса» объёмными и поверхностными источниками теплоты. Выявлены условия, при которых закон нагрева контактной поверхности «формирующий электрод-деталь» можно считать линейным, показана целесообразность разбивки процесса восстановления на две стадии: статическую и динамическую с различными параметрами (ток, усилие нажатия) и применения двухпозиционного управления. Получена передаточная функция интеллектуального датчика температуры контактной поверхности, содержащая два калибровочных коэффициента. Для определения мультипликативного и аддитивного калибровочных коэффициентов k_1 и k_2 предложено использование аналитических решений линейных краевых задач теплопроводности с последующим уточнением на экспериментальном стенде.

Для эффективного использования интеллектуальной системы контроля и управления техноло-

гическим процессом необходимо использовать силовой трансформатор с возможностью переключения напряжений первичной или вторичной обмотки.

Библиографический список

1. Инновационные технологии при решении инженерных задач: матер. Всерос. студенческой науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения профессора Б.М. Аскинази. – Ульяновск: ГСХА, 2011. – 246 с.

2. Чижов В.Н., Болтенков А.А., Селиверстов М.В., Телгожаева Ф.С. Математическое моделирование тепловых процессов в системе «Электрод-деталь-теплоотводящая масса» при ремонте деталей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 12. – С. 80-85.

3. Болтенков А.А., Сарсенбаев Е.А., Селиверстов М.В., Шерышев В.П. Расчёт времени нагрева симметричной электроконтактной пары до температуры рекристаллизации материала контакт-деталей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 1 (135). – С. 126-132.

4. Долгов А.Д. Применение микроконтроллеров в интегральных датчиках // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 3 (110). – С. 268-272.

5. Бельчикова О.Г., Болтенков А.А., Сарсенбаев Е.А., Шерышев В.П. Передаточная функция интеллектуального датчика температуры контактной поверхности электрического контакта // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1 (147). – С. 161-168.

6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 735 с.

7. Лекции об уравнениях с частными производными / И.Г. Петровский. – Изд. 3-е, доп. – М.: Высшая школа, 1961. – 400 с.

8. Пат. РФ № 2635385 от 13 ноября 2017 г. Способ определения времени срабатывания защиты токоведущих контактных соединений ком-

мутационных аппаратов от перегрева / Болтенков А.А., Селиверстов М.В., Шерышев В.П., Бекбаев А., Сарсенбаев Е.А.

References

1. Materialy Vserossiyskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii pri reshenii inzhenernykh zadach», posvyashchenoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora B.M. Askinazi. – Ulyanovsk, 2011. – 246 s.

2. Chizhov V.N., Boltenkov A.A., Seliverstov M.V., Telgozhaeva F.S. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh protsessov v sisteme «Elektrod – detal – teplootvodyashchaya massa» pri remonte detaley // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2009. – № 12. – S. 80-85.

3. Boltenkov A.A., Sarsenbaev Ye.A., Seliverstov M.V., Sheryshev V.P. Raschet vremeni nagreva simmetrichnoy elektrokonnaktnoy pary do temperatury rekristallizatsii materiala kontakt-detaley // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – № 1 (135). – S. 126-132.

4. Dolgov A.D. Primenenie mikrokontrollerov v integralnykh datchikakh // Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.Ye. Alekseeva. – 2015. – № 3 (110). – S. 268-272.

5. Belchikova O.G., Boltenkov A.A., Sarsenbaev Ye.A., Sheryshev V.P. Peredatochnaya funktsiya intellektualnogo datchika temperatury kontaktnoy poverkhnosti elektricheskogo kontakta // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – № 1 (147). – S. 161-168.

6. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki. – M.: Nauka, 1977. – 735 s.

7. Petrovskiy I.G. Lektsii ob uravneniyakh s chastnymi proizvodnymi. – Izd. 3-e. – M.: Fizmatlit, 1961. – 400 s.

8. Sposob opredeleniya vremeni srbatyvaniya zashchity tokovedushchikh kontaktnykh soedineniy kommutatsionnykh apparatov ot peregreva / A.A. Boltenkov, M.V. Seliverstov, V.P. Sheryshev, A. Bekbaev, Ye.A. Sarsenbaev // Patent RF № 2635385 ot 13 noyabrya 2017 g.

