

stochnykh vod ot mekhanicheskikh primesei. Patent Rossiiskoi Federatsii No. 2525905, MPK B01D 25/00, B01D 29/56, C02F 1/62 Biul. No. 23, 2014.

5. Bezrodnov N.A., Kuznetsov P.I., Melikhov V.V., Konstantinova T.G. Ustanovka dlia ochistki vody preimushchestvenno dlia sistem kapelnogo orosheniia. Patent Rossiiskoi federatsii No. 2411719. MPK A01G 25/09. Biul. No. 5, 2011.

6. Rogachev A.F., Saldaev A.M., Eliseev A.K., Rogachev D.A. Ustanovka dlia prigotovleniia i

vneseniia udobritelnykh rastvorov s polivnoi vodoi v sistemakh kapelnogo orosheniia. Patent Rossiiskoi Federatsii No. 2219698. MPK A01S 23/04, A01G 25/02. Biul. No. 36, 2003.

7. Shmidt D., Vasileva E.S. Mitilineos A.G. Orekhov E.E. Vilkova A.N., Frolova M.A. Sistema ochistki zhidkosti. Patent Rossiiskoi Federatsii No. 2686199. MPK C01F 1/00 B01J 20/00. Biul. No. 12, 2019.



УДК 631.371:621.31 А.А. Болтенков, Е.А. Сарсенбаев, М.В. Селивёрстов, Н.Т. Каликасов
DOI: 10.53083/1996-4277-2021-202-08-102-107

A.A. Boltenkov, E.A. Sarsenbaev, M.V. Seliverstov, N.T. Kalikasov

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ НАГРЕВОМ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ДИСК

INTELLECTUALIZATION OF CONTROL PROCESSES AND MONITORING OF ELECTRIC CONTACT HEATING DURING RESTORATION OF DISC-TYPE PARTS

Ключевые слова: электрический контакт, контактная поверхность, температура нагрева, интеллектуальный контроль, восстановление режущей способности, электромеханическое деформирование, деталь типа диск.

Получена модифицированная функция преобразования интеллектуального датчика температуры контактной поверхности (ИД ТКП) электрического контакта «формирующий электрод-деталь», оказывающей существенное влияние на качество восстановления режущей кромки дисков почвообрабатывающих машин, которая лишь незначительно может превышать температуру рекристаллизации материала детали. Настройка датчика на восстановление конкретной детали достигается разработкой и программированием на микроконтроллере функции преобразования и хранения в энергонезависимой памяти интеллектуальной системы режимных параметров. Целью работы является уточ-

нение функции преобразования ИД ТКП и обоснование возможности её применения к решению поставленной задачи контроля и управления. Весь процесс восстановления разбивается на 2 стадии: статическую (без вращения детали), продолжительностью 1-2 с, на которой осуществляется контроль температуры в режиме динамического мониторинга, и динамическую с заданной скоростью вращения диска. В качестве физической модели процесса на 1-й стадии рассматривается плоский контакт «электрод-деталь» с выделенным по центру тонким составным теплоизолированным с торцов и боковой поверхности стержнем. С помощью численного эксперимента показано, что введение в исходную функцию преобразования полинома с 3 поправочными коэффициентами позволяет уменьшить методическую погрешность косвенных измерений температуры контактной поверхности до 0,5°С на интервале времени от 1,2 до 1,9 с (материал электрода – электрокерамика).

Keywords: *electric contact, contact surface, heating temperature, intelligent control, restoration, electromechanical deformation, disc-type part*

We have obtained a modified function of transforming intelligent sensor of contact surface temperature (IS CST) of electric contact “forming the electrode-part” and having a significant influence on quality of restoring the cutting edge of discs of tillage machinery which may only slightly exceed recrystallization temperature of the material of the part. Setting the sensor to restore a specific part is achieved by developing and programming on the microcontroller the function of converting and storing the intelligent system of standard parameters in the non-volatile memory. The research goal is to clarify the function of transforming IS CST and to substantiate the opportunity of its application for solution of the set task of control and monitoring. We have

provided a schematic diagram of a plant for electrocontact restoration of the cutting capacity of disk tillage tools. The entire restoration process is divided into two stages: static one (without rotating the part) with duration of 1-2 seconds when temperature is monitored in the dynamic mode; and dynamic one, with the set rotation speed of the disc. As a physical analogue of the process, we have considered an “electrode-part” flat contact with a center-located thin compound bar thermally insulated at the ends and on the side surface. In addition, a numerical experiment is used to show that introduction to the original polynomial transformation function with three correction indexes enables to reduce the methodological error of measurements of the contact surface temperature to 0.5°C in the time interval from 1.2 seconds to 1.9 seconds (the electrode material is electro-ceramics).

Болтенков Андрей Анатольевич, к.т.н., ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Boltenkov_A@mail.ru.

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович, PhD, ассистент-профессор, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: erlansar@mail.ru.

Селивёрстов Максим Владимирович, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Seliv-Maks@yandex.ru.

Каликасов Нурсултан Темирханович, докторант, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: kalikassov@mail.ru.

Boltenkov Andrey Anatolyevich, Cand. Tech. Sci., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Boltenkov_A@mail.ru.

Sarsenbaev Erlan Aliaskarovich, PhD, Asst. Prof., Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: erlansar@mail.ru.

Seliverstov Maksim Vladimirovich, Asst. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Seliv-Maks@yandex.ru.

Kalikassov Nursultan Temirkhanovich, degree applicant, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: kalikassov@mail.ru.

Введение

Электроконтактный нагрев (ЭКН) находит широкое применение в ремонте сельскохозяйственной техники. С помощью ЭКН с одновременным электромеханическим деформированием (ЭМД) восстанавливается, например, режущая способность деталей типа диск – рабочих органов почвообрабатывающих машин [1].

Целью работы является совершенствование алгоритма контроля и управления параметрами процесса электроконтактного нагрева при восстановлении деталей типа диск.

Объект и методы

Ключевое значение для показателей качества деталей, восстановленных с помощью электромеханического деформирования, имеет температура контактной поверхности (ТКП), которая, в свою очередь, лишь незначительно превышает температуру рекристаллизации детали [1, 2]. Существенную роль в достижении этого результата играет включение метода интеллектуального контроля ТКП в систему управ-

ления. Данный метод предполагает последовательность процедур, включающих измерение значений системы управления, цифровую обработку и получение обратной связи.

Перспективным приемом управления и контроля над технологическим процессом восстановления деталей, основанным на ЭКН, также является применение интеллектуальных методов управления и обработки информации с помощью микропроцессорных датчиков [3].

Восстановление конкретной детали путем настройки датчика достигается разработкой, программированием функции преобразования (ФП) на микроконтроллере, а также хранением режимных параметров в энергонезависимой памяти.

В работе [4] получена ФП интеллектуального датчика температуры контактной поверхности (ИД ТКП) электрического контакта. В [5] показан пример её практического использования. Работа посвящена уточнению функции преобразования ИД ТКП и обоснованию возможности её применения к решению задачи контроля ТКП.

Модификация функции преобразования интеллектуального датчика температуры контактной поверхности заключается во введении в неё 3 поправочных коэффициентов, полученных с привлечением аналитических решений модельных задач теплопроводности.

Весь процесс ЭМД разбивается на 2 стадии: статическую (без вращения детали), продолжительностью 1-2 с, и динамическую с заданной скоростью вращения диска ω (рис. 2 а, б) [1, 4].

Экспериментальная часть

Исследования, связанные с прогнозированием теплового состояния контактной системы и уточнением функции преобразования ИД ТКП, проводились с использованием экспериментальной установки, описанной в работе [6]. Данная установка позволяет осуществлять восстановление режущей способности (заострение) изношенной детали типа диск с помощью ЭМД, а её измерительная часть – фиксировать при электромеханическом деформировании темпе-

ратурные изменения восстанавливаемой детали и параметры энерговода.

На рисунке 1 а, б представлена схема процесса ЭМД режущей кромки диска почвообрабатывающего орудия. В качестве физической модели процесса восстановления предложено использовать плоский контакт «электрод – деталь» (рис. 2 а) с выделенным по центру (ось X-X, рис. 1 а) тонким составным стержнем (рис. 2 б) [1]. Торцы и боковая поверхность стержня теплоизолированы, поскольку на малом интервале времени теплоотводом от них можно пренебречь.

Ввод энергии осуществляется до тех пор, пока температура контактной поверхности между электродом и деталью либо не достигнет значения, равного температуре рекристаллизации материала восстанавливаемой детали, либо с небольшим превышением её ($T_{ДЕФ} \approx T_P$) [1]. В данном диапазоне температур наблюдается наиболее полное соответствие процесса деформирования режущей кромки заданным параметрам её качества.

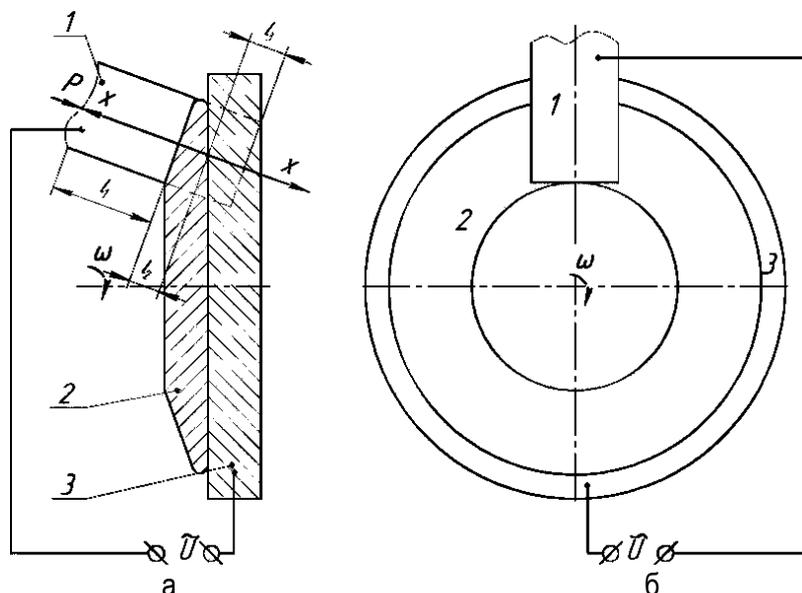


Рис. 1. Схема ЭМД режущей кромки диска:
 а – поперечный разрез, б – вид системы в плане; 1 – формулирующий электрод,
 2 – восстанавливаемый диск, 3 – теплоотводящая масса; l_1 – высота электрода,
 l_2 – средняя толщина восстанавливаемого участка режущей кромки,
 l_3 – толщина теплоотводящей массы

Полагаем, что тепловая мощность, выделенная на контактной поверхности, характеризуется равномерным распределением по всей контактной поверхности. Объемные тепловые источники w_1 в стержне-электроде являются постоян-

ными (не зависят от времени), кроме того, отсутствует их зависимость от пространственных координат. На величину тепловой мощности оказывает влияние исключительно сопротивление материала электрода при средней темпера-

туре процесса нагрева $\frac{T_0 + T_{max}}{2}$ (T_0 – начальное значение температуры электрода), которое определяется по формуле:

$$W = \frac{I_1^2 \rho_{20} \left(1 + \alpha \frac{T_0 + T_{max}}{2}\right)}{S_1^2}, \quad (1)$$

где I_1 – вторичный ток трансформатора на 1-й стадии процесса;

ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление материала электрода при температуре 20°C;

α – температурный коэффициент сопротивления;

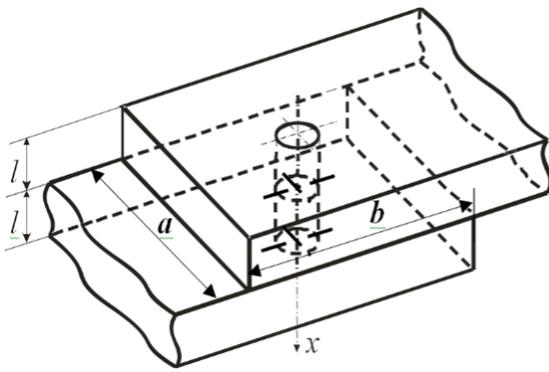
$S_1 = a \times b$ – площадь нахлёстки плоского контакта, согласованная с размерами формирующего электрода и диска, что представлено на рисунке 2 а.

При этом часть выделенной на контактном сопротивлении удельной мощности q_1 расходуется на нагрев детали через торец стержня электрода:

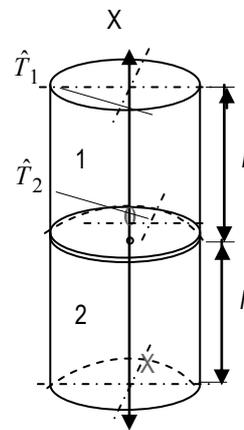
$$q_1 = k_1 \frac{I_1^2 R_k}{S_1}, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент различия теплофизических характеристик материалов детали и электрода;

R_k – переходное контактное сопротивление.



а



б

Рис. 2. Схематизация процесса нагрева системы «электрод-деталь»:

а – физическая модель процесса ЭКН системы «электрод-деталь» (1 – стержень-электрод);
б – система координат и точки термометрирования в составном стержне (2 – стержень-деталь)

При заданных величинах физических факторов w_1 , q_1 и измеренной температуре торца \hat{T}_1 (рис. 2 б) прогнозируемая температура контактной поверхности $\tilde{T}_2(\tau^{(k)})$ определяется по формуле (функция преобразования ИД ТКП [4]):

$$\tilde{T}_2(\tau^{(k)}) = k_2 \left[\Phi(\tau^{(k)}) T_1(\tau^{(k)}) + [1 - \Phi(\tau^{(k)})] T_0 + \frac{I_1^2 \rho_{20} \left(1 + \alpha \frac{T_0 + T_{max}}{2}\right)}{c \gamma S_1^2} \tau^{(k)} \right], \quad (3)$$

где $\Phi(\tau^{(k)})$ – динамический параметр, который вычисляется по формуле:

$$\Phi(t^{(k)}) = \left\{ 1 - \left[2 \left(\frac{\lambda_1}{c_1 \gamma_1 l_1^2} t^{(k)} + 1/3 \right) \right]^{-1} \right\}^{-1}, \quad (4)$$

c_1 , γ_1 – удельная теплоёмкость и плотность материала электрода;

$\tau^{(k)}$ – отсчёт времени;

k – порядковый номер измерения;

$k=1, \dots, n$; n – номер последнего измерения.

Определение калибровочных коэффициентов k_2 и k_3 осуществляется с применением аналитического решения задачи теплопередачи от тепловыделяющей контактной поверхности в стержне с теплоизолированной внешней по-

верхностью [4]. Для определения коэффициентов проведен численный эксперимент (рис. 3 а).

Для электрода из композиционного материала (электрокерамики) использовались следующие исходные данные: $l_1=0,003$ м; $\lambda_1=18$ Вт/(м·°С); $c_1=400$ Дж/(кг·°С); $\gamma_1=10^4$ кг/м³; $I_1=1000$ А; $\alpha_1=0,008$ (°С)⁻¹; $\rho_{20}=0,27 \times 10^{-4}$ Ом·м; $T_0=20$ °С; $T_{max}=700$ °С; $S_k=2,56 \times 10^{-4}$ м²; $R_k=0,002181$ Ом; $\kappa_1=0,5$.

Результаты исследований и их обсуждение

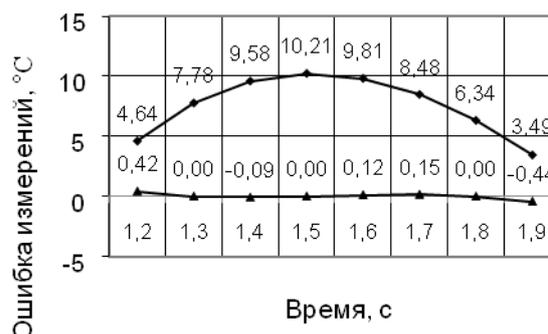
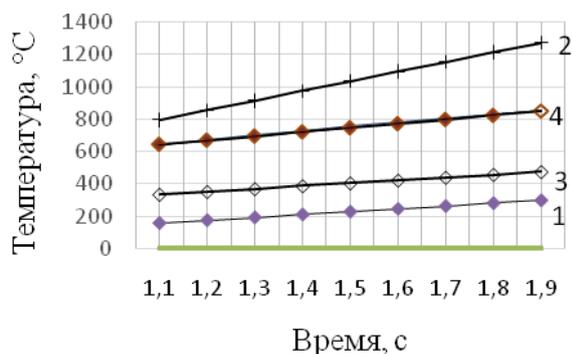
Результаты вычисления температуры контактной поверхности в статическом режиме на интервале нагрева модельного стержня-электрода по линейному закону представлены на рисунке 3 а.

Обозначения на рисунке 3 а: 1 – модель измеренной температуры открытой поверхности электрода; 2 – ТКП, вычисленная по формуле

(3) без калибровочных коэффициентов ($k_2 = 1, k_3 = 0$); 3 – вычисления ТКП, выполненные без учёта нагрева электрода внутренними источниками теплоты; 4 – вычисления по формуле (3) с калибровочными коэффициентами $k_2=0,44$ и $k_3=294,96$.

Время завершения первой стадии восстановления режущей кромки диска составляет 1,49 с, что получено по методике [5], в результате анализа контроля температуры контактной поверхности в режиме динамического мониторинга на интервале 1,1 ÷ 2,0с.

Кривая (обозначение \diamond), представленная на рисунке 3 б, показывает, что ошибка вычислений ТКП датчиком с функцией преобразования (3) может достигать 10°С, что делает её не пригодной для контроля температуры контактной поверхности на 1-й стадии процесса ЭМД.



а б

Рис. 4. Результаты численного эксперимента:

а – результаты вычисления (измерения) температуры ТКП на интервале времени от 1,1 до 1,9 с;

б – динамическая погрешность измерений при вычислениях ТКП:

\diamond – по формуле (3), Δ – по уточнённой формуле (5)

С другой стороны, введение в функцию преобразования полинома $P(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2$ с тремя поправочными коэффициентами $a_0 = -105,7; a_1 = 152,4; a_2 = -50,1$ (5), позволяет уменьшить динамическую погрешность измерений до 0,5°С на интервале времени от 1,2 до 1,9 с (рис. 3 б (обозначение – Δ)).

$$T_2(\tau^{(k)}) = \tilde{T}_2(\tau^{(k)}) + a_0 + a_1\tau^{(k)} + a_2[\tau^{(k)}]^2. (5)$$

Выводы

Переход к стержневой системе и использование в качестве физической модели ЭКН системы «электрод-деталь» теплоизолированного

тонкого стержня, выделенного в центральной части формирующего электрода, с учётом аналитического решения задачи теплопроводности, позволяет получить расчётную модель и более точную функцию преобразования интеллектуального датчика ИД ТКП электрического контакта.

Библиографический список

1. Контроль температуры контактной поверхности «электрод-деталь» при восстановлении режущей кромки дисков почвообрабатывающих машин / В. Н. Чижов, А. А. Болтенков, О. Г. Бельчикова, М. В. Селивёрстов. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского госу-

дарственного аграрного университета. – 2018. – № 5 (163). – С. 155-163.

2. Иванайский, В. В. Метод исследования температурного профиля при синтезе компактных материалов упрочняющих покрытий с применением концентрированных источников энергии / В. В. Иванайский, А. В. Ишков, Д.И. Илющенко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 1 (183). – С. 134-141.

3. Долгов, А. Д. Применение микроконтроллеров в интегральных датчиках / А. Д. Долгов. – Текст: непосредственный // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2015. – № 3 (110). – С. 268-270.

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

5. Патент. РФ № 2635385 от 13 ноября 2017 г. Способ определения времени срабатывания защиты токоведущих контактных соединений коммутационных аппаратов от перегрева. – Текст: непосредственный.

6. Boltenev, A., Chizhov, V., Sheryshev, V. (2002). Modelling and prediction of the conditions of the process of electric resistance sintering of metallic powder materials in reconditioning of components. *Welding International*. 16: 69-72. Doi: 10.1080/09507110209549493.

References

1. Chizhov V.N., Boltenev A.A., Belchikova O.G., Seliverstov M.V. Kontrol temperatury kontaktnoi poverkhnosti «elektrod-detal» pri vostanovlenii rezhushchei kromki diskov pochvoobrabatyvaiushchikh mashin // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 5 (163). – S. 155-163.

2. Ivanaiskii V.V. Metod issledovaniia temperaturnogo profilia pri sinteze kompaktnykh materialov uprochniaiushchikh pokrytii s primeneniem kontsentrirrovannykh istochnikov energii / V.V. Ivanaiskii, A.V. Ishkov., D.I. Iliushchenko // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – No. 1 (183). – S. 134-141.

3. Dolgov A.D. Primenenie mikrokontrollerov v integralnykh datchikakh // Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva. – 2015. – No. 3 (110). – S. 268-270.

4. Belchikova O.G., Boltenev A.A., Sarsenbaev E.A., Sheryshev V.P. Peredatochnaia funktsiia intellektualnogo datchika temperatury kontaktnoi poverkhnosti elektricheskogo kontakta // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 1 (147). – S. 161-168.

5. Patent. RF No. 2635385 ot 13 noiabria 2017 g. Sposob opredeleniia vremeni srbatyvaniia zashchity tokovedushchikh kontaktnykh soedinenii kommutatsionnykh apparatov ot peregreva.

6. Boltenev, A., Chizhov, V., Sheryshev, V. (2002). Modelling and prediction of the conditions of the process of electric resistance sintering of metallic powder materials in reconditioning of components. *Welding International*. 16: 69-72. Doi: 10.1080/09507110209549493.

