

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИБОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КАТУШКОЙ

© 2024 г. О.А. Колганов<sup>1,\*</sup>, К.И. Доронин<sup>2,\*\*</sup>, А.С. Голев<sup>3,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», Россия 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2

<sup>3</sup>ООО «КОНСТАНТА», Россия 198097 Санкт-Петербург, Огородный переулок, 21, литер А, оф. 404  
E-mail: \*kolganoff2014@yandex.ru; \*\*doronin.k.i@mail.ru; \*\*\*artemgolev1999@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2024; после доработки 31.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024

Рассмотрены вопросы повышения точности оценки параметров движения индентора в первичном преобразователе прибора динамического инструментального индентирования с использованием двух встречно включенных обмоток катушки (дифференциальной катушки). Расчет характеристик первичного преобразователя выполнен на основе компьютерного моделирования и решения задачи пошаговой условной оптимизации относительных размеров магнита ударника и катушки. Представлены результаты исследования первичного преобразователя с дифференциальной катушкой (сравнительных оценок регистрируемого сигнала — ЭДС и динамического модуля упругости стали Ст.3) по отношению к существующему первичному преобразователю датчика прибора «ТПЦ-7», которые показали его преимущество.

*Ключевые слова:* динамическое инструментальное индентирование, компьютерное моделирование, контактное ударное взаимодействие, параметры движения, постоянный магнит.

## OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE PRIMARY TRANSDUCER OF THE DYNAMIC INSTRUMENTED INDENTATION DEVICE WITH A DIFFERENTIAL COIL

© 2024 O. A. Kolganov<sup>1,\*</sup>, K. I. Doronin<sup>2,\*\*</sup>, A. S. Golev<sup>3,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, Russia 197101 St. Petersburg, Kronverksky Ave., 49

<sup>2</sup>St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Russia 199106 St. Petersburg, 21st Line of Vasilevsky Island, 2

<sup>3</sup>LLC CONSTANT, Russia 198097 St. Petersburg, Ogorodny lane, 21, letter A, of. 404  
E-mail: \*kolganoff2014@yandex.ru; \*\*doronin.k.i@mail.ru; \*\*\*artemgolev1999@gmail.com

The issues of improving the accuracy of estimating the indenter motion parameters in the primary converter of a dynamic instrumented indentation device using two counter-connected coil windings (differential coil) are considered. The calculation of the characteristics of the primary converter is based on computer modeling and solving the problem of step-by-step conditional optimization of the relative dimensions of the striker magnet and coil. The results of a study of a primary converter with a differential coil (comparative estimates of the recorded signal — EMF and the dynamic modulus of elasticity of steel St.3) in relation to the existing primary sensor converter of the TPTS-7 device, which showed its advantage.

*Keywords:* dynamic instrumented indentation, computer modeling, contact-impact interaction, motion parameters, permanent magnet.

DOI: 10.31857/S0130308224060092

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка механических характеристик материалов является актуальной задачей в различных отраслях промышленности. Одним из перспективных методов безобразцового контроля механических свойств материалов и изделий является метод динамического инструментального индентирования (ДИИ), сущность которого заключается в непрерывной регистрации параметров движения индентора в процессе его контактного ударного взаимодействия (КУВ) с испытываемым материалом. В настоящее время для регистрации параметров движения ударника при КУВ применяется магнитоиндукционный метод [1—3]. Для повышения точности оценки параметров движения индентора предлагается совершенствование первичного преобразователя (ПП) на основе использования дифференциальной катушки (рис. 1), которая ввиду симметричности конструкции минимизирует зависимость ЭДС от перемещения магнита, при условии, что диапазон перемещения многократно меньше суммарной высоты обмоток и лежит в области их раздела.

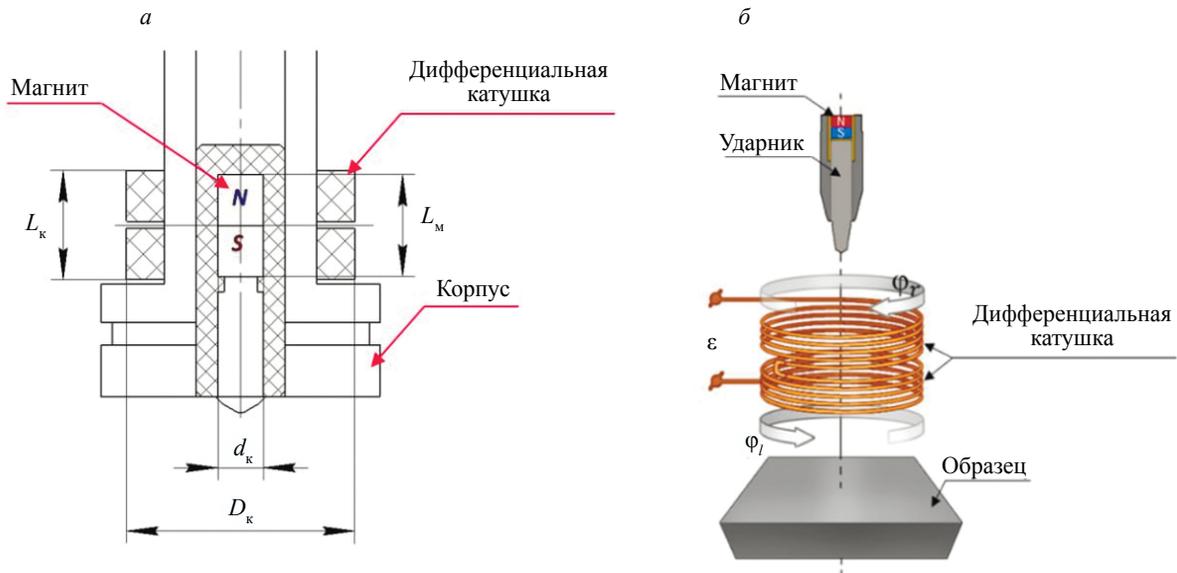


Рис. 1. Иллюстрация ПП с дифференциальной катушкой: эскиз конструкции ПП (а); схема ПП (б).

Целью исследования является определение значений параметров ПП, соответствующих требованиям кинетической энергии и скорости удара, массе ударника (бойка), радиусу индентора (шарикового наконечника) по ГОСТ Р 8.969—2019 (ИСО 16859-1:2015) [4] и обеспечивающих качество сигнала ЭДС, а также точность оценки динамического модуля упругости материала.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЭДС  $e(t)$ , наводимая на выходах дифференциальной катушки при движении магнита через нее, зависит от ряда параметров, влияющих на качество регистрируемого сигнала:

$$e(t) = f(d_k, L_k, L_m, d_m, \mu_0, N, n, c, L, R, S, t),$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость проводника;  $N$  — количество витков каждой из обмоток дифференциальной катушки;  $R$  — сопротивление проводника;  $n$  — число слоев намотки;  $c$  — толщина намотки;  $S$  — площадь поперечного сечения проводника;  $d_k$  — диаметр дифференциальной катушки;  $L_k$  — длина дифференциальной катушки;  $L_m$  — длина постоянного магнита;  $d_m$  — диаметр постоянного магнита.

Исследование закономерностей влияния параметров ПП на регистрируемый  $e(t)$  выполнялось с использованием компьютерной модели, разработанной на основе интегрированной платформы для моделирования Comsol Multiphysics с интерфейсом Magnetic Fields модуля AC/DC, отражающей наводимую в дифференциальной катушке  $e(t)$  при пролете постоянного магнита с ускорением свободного падения при нормируемой скорости удара [5]. В качестве варьируемого входного параметра принимались значения диаметра магнита ( $d_m$ ). Оценка оптимальных значений параметров ПП осуществлялась на основе решения задач пошаговой условной оптимизации в следующем виде:

$$e(t) = f\left(\frac{d_m}{L_m}\right) \rightarrow \max, \quad e(t) = f\left(\frac{L_m}{L_k}\right) \rightarrow \max, \quad e(t) = f\left(\frac{L_k}{d_k}\right) \rightarrow \max.$$

В табл. 1 представлены основные параметры и характеристики ПП, соответствующие основным требованиям по параметрам удара, предъявляемым к датчикам типа D по ГОСТ Р 8.969—2019 (ИСО 16859-1:2015) [4].

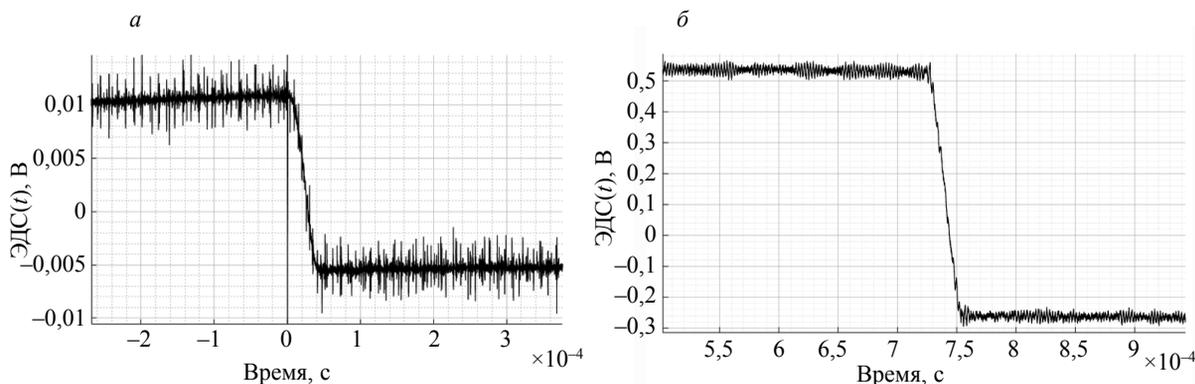
Параметры и характеристики прототипа ПП с ДКИ

Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра
Диаметр магнита	$d_m$	4,0 мм
Длина магнита	$L_m$	8,5 мм
Внутренний диаметр дифференциальной катушки	$d_k$	14,0 мм
Сопротивление дифференциальной катушки	$R$	62,4 Ом
Длина проводника	$L$	30 м
Количество витков обмоток дифференциальной катушки	$N$	694
Число слоев	$N_l$	8

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результативность разработки прототипа ПП с ДКИ определялась на основе сравнительных оценок регистрируемой  $e(t)$  при КУВ с образцом из углеродистой стали, а также оценок динамического модуля упругости материала по отношению к ПП датчика прибора «ТПЦ-7», разработанного Институтом прикладной физики Национальной академии наук Беларуси и имеющего одну обмотку катушки [6, 7].

При сравнительной оценке качества сигнала ЭДС при КУВ использовался плоский образец из стали Ст. 3. Сигнал ЭДС регистрировался с помощью цифрового осциллографа марки Rohde Schwarz, а дальнейшая обработка полученных данных осуществлялась на компьютере с помощью программного обеспечения, реализованного в программной среде MATLAB. На рис. 2 представлены графики  $e(t)$ , полученные с ПП прибора «ТПЦ-7» и с прототипа ПП с ДКИ.

Рис. 2. Графики  $e(t)$ : ПП прибора «ТПЦ-7» (а); прототип ПП с ДКИ (б).

Оценка качества регистрируемой  $e(t)$  производилась на основе оценки показателя SNR (отношение амплитуд сигнал/шум):

$$SNR = 20 \log_{10} \left( \frac{A_{\text{сигнал}}}{A_{\text{шум}}} \right),$$

где  $A_{\text{сигнал}}$  — амплитуда  $e(t)$ ;  $A_{\text{шум}}$  — амплитуда шумовой составляющей.

Результаты оценки показателя SNR для ПП прибора «ТПЦ-7» и прототипа ПП с ДКИ представлена в табл. 2.

Сравнительный анализ результатов, представленных в табл. 4, свидетельствует о том, что прототип ПП с ДКИ менее восприимчив к внешним помехам, имеет меньший уровень собственных шумов, за счет этого способен обеспечивать возможность обработки  $e(t)$  с меньшими энергетическими характеристиками по сравнению с ПП прибора «ТПЦ-7».

Таблица 2

## Значения показателя SNR (отношение сигнал/шум)

Тип ПП	$A_{\text{сигнал}}, \text{В}$	$A_{\text{шум}}, \text{В}$	SNR, дБ
ПП прибора «ТПЦ-7»	0,0166	0,0466	9,5
Прототип ПП с ДКИ	0,7750	0,0811	19,6

Таблица 3

Экспериментальные оценки динамического модуля упругости  $E_d$ , ГПа

№ изм.	1	2	3	4	5	6	7	8
ПП прибора «ТПЦ-7»	177	193	177	154	171	194	171	196
Прототип ПП с ДКИ	181	175	180	175	187	179	175	187

Таблица 4

## Результаты оценки погрешностей измерения модуля упругости

Тип ПП	Систематическая погрешность, ГПа	Случайная погрешность, ГПа	Основная (суммарная) погрешность, ГПа
ПП прибора «ТПЦ-7»	11,5	24,7	36,2
Прототип ПП с ДКИ	3,9	9,3	13,2

Экспериментальная оценка динамического модуля нормальной упругости материала по данным диаграмм вдавливания индентора производилась согласно ГОСТ Р 56474—2015 [1] на плоском образце типа I (по ГОСТ 1497—84 (ИСО 6892-8) из стали Ст. 3 по результатам серии из 12-и измерений с использованием прототипа ПП с ДКИ и ПП прибора «ТПЦ-7» и представлена в табл. 3.

Экспериментальная оценка модуля упругости материала образца также производилась на основе обработки результатов его испытаний на разрыв по ГОСТ 1497—84 (ИСО 6892-84) [8] с использованием испытательной машины «walter+bai ag 150 кН» и составила 179 ГПа, которая далее принималась в качестве его опорного значения.

Оценка погрешностей измерения модуля упругости проводилась согласно методике, изложенной в ГОСТ Р 56474—2015 [1], результаты которой представлены в табл. 4.

Сравнительный анализ погрешностей свидетельствует о преимуществе разработанного прототипа ПП с ДКИ по сравнению с ПП прибора «ТПЦ-7».

## ВЫВОДЫ

Разработанный алгоритм расчета параметров ПП с ДКИ, проведенный на основе результатов компьютерного моделирования и решения задачи пошаговой условной оптимизации его относительных геометрических размеров, позволил выполнить разработку его прототипа и определить граничные условия его применения.

Сравнительная оценка  $e(t)$ , регистрируемой прототипом ПП с ДКИ по отношению к существующему ПП датчика прибора «ТПЦ-7», показала увеличение значения показателя SNR (отношение сигнал/шум) примерно в 2 раза, что свидетельствует о его лучшей помехозащищенности.

Полученные результаты сравнительной оценки динамического модуля упругости стали Ст.3 позволяют сделать вывод о том, что суммарная погрешность измерений при использовании ПП с ДКИ будет меньше, чем при использовании ПП прибора «ТПЦ-7».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 56474—2015. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. М.: Стандартинформ, 2015. С. 15—17.

2. Рудницкий В.А., Рабцевич А.В. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов // Дефектоскопия. 1997. № 4. С. 79—86.

3. Егоров Р.А., Ильинский А.В., Кузьмичев М.В., Федоров А.В. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования // Дефектоскопия. 2020. № 6. С. 61—69.
4. ГОСТ 8.969—2019 (ИСО 16859-1:2015) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1. Метод измерений.
5. *Khoshev A., Kolganov O., Egorov R.A., Fedorov A.V., Kinzhagulov I.U.* Computer Simulation of Registration of Indenter Motion in the Process of Contact-Impact Interaction / 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2023. P. 1—4.
6. Колганов О.А., Егоров Р.А., Ильинский А.В., Хошев А.Е., Федоров А.В. Дифференциальное включение катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 1. С. 74—80.
7. Твердомеры портативные цифровые ТПЦ // GRmetr.ru URL: <https://grmetr.ru/gosreestr/1409012-89241-23-tpts> (дата обращения: 26.05.2024).
8. ГОСТ 1497—84 (ИСО 6892-84) Методы испытаний на растяжение: дата введения 01.01.1986. М.: Стандартиформ, 2008. 26 с.

#### REFERENCES

1. GOST R 56474—2015. Non-destructive control of physical and mechanical properties of materials and coatings of space technology by dynamic indentation. М.: Standartinform, 2015. P. 15—17.
2. *Rudnitsky V.A., Rabtsevich A.V.* The method of dynamic indentation for evaluating the mechanical characteristics of metallic materials // Defektoskopiya. 1997. No. 4. P. 79—86.
3. *Egorov R.A., Ilyinsky A.V., Kuzmichev M.V., Fedorov A.V.* Hardware and algorithmic support of the dynamic indentation process // Defektoskopiya. 2020. No. 6. P. 61—69.
4. GOST 8.969—2019 (ISO 16859-1:2015) State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). Metals and alloys. Determination of hardness according to Lieb scales. Part 1. Measurement method.
5. *Khoshev A., Kolganov O., Egorov R.A., Fedorov A.V., Kinzhagulov I.U.* Computer Simulation of Registration of Indenter Motion in the Process of Contact-Impact Interaction / 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2023. P. 1—4.
6. *Kolganov O.A., Egorov R.A., Ilyinsky A.V., Khoshev A.E., Fedorov A.V.* Differential inclusion of inductors for recording the parameters of the striker's motion during dynamic indentation // Izvestiya vysshchih uchebnykh zavedeniy. Instrumentation. 2023. V. 66. No. 1. P. 74—80.
7. Portable digital TPC hardness testers // GRmetr.ru URL: <https://grmetr.ru/gosreestr/1409012-89241-23-tpts> (date of reference: 05/26/2024).
8. GOST 1497—84 (ISO 6892-84) Tensile testing methods: date of introduction 01.01.1986. М.: Standartinform, 2008. 26 p.