

УДК 621.865.8-112.5:530.145.001.57

**В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, Р.Г. Шаповалов****ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ**

*Поставлена цель исследования вопросов точности позиционирования робота с рекуперацией энергии, для чего была рассмотрена схема связей систем координат положения захватного устройства робота и проведены исследования линейной и угловой ошибок произвольной точки захватного устройства, которые чаще всего возникают за счет ошибок отработки приводами манипулятора программных значений обобщенных координат, соответствующих заданному положению захватного устройства. В ходе исследования было выполнено моделирование положения центра масс исполнительного органа манипулятора с детальной во времени и сформулированы конструкторско-технологические рекомендации по повышению точности позиционирования промышленных роботов с рекуперацией энергии. Были определены направления повышения точности позиционирования роботов, основные из которых связаны с уменьшением числа шарнирных соединений в их конструктивном исполнении.*

*Рекуперация; энергия; точность; позиционирование; захватное устройство; положение; ошибка; промышленный робот; деталь; система координат.*

**V.I. Butenko, D.S. Durov, R.G. Shapovalov****RESEARCH ON THE ACCURACY OF POSITIONING AN INDUSTRIAL  
ROBOT WITH ENERGY RECUPERATION**

*This article aims to research issues of precision positioning robot with energy recuperation. The scheme links coordinate systems of robot gripper is considered and conducted a study of linear and angular error an arbitrary point of service devices. These errors most commonly occur due to processing errors-driven manipulator program values of generalized coordinates that match the given status of gripper device. The research was performed by simulation the center of mass the executive body of the manipulator by component in time and design guidelines for improving the positioning accuracy of industrial robots with energy recuperation are engineered. Areas improve the accuracy of positioning robots, the main of which are associated with fewer joints in their constructive performance were identified.*

*Recuperation; energy; accuracy; positioning; robot gripper; rule; errors; positioning robots; system of coordinates.*

Для современных промышленных предприятий, имеющих производственные линии по выпуску крупносерийных деталей и изделий различного назначения, актуальной является задача разработки, создания промышленных роботов с рекуперацией энергии, позволяющих существенно повысить быстродействие при выполнении технологических и иных операций и снизить энергоемкость [1–3]. К такого рода устройствам относится промышленный робот с рекуперацией энергии «Краб», грузоподъемностью 2,5 кг, предусматривающий наличие аккумулятора потенциальной энергии в виде упругого элемента (пружин) и управляемых упорфиксаторов с электромагнитами (рис. 1).

Как показывает опыт использования таких роботов на ряде машиностроительных предприятий, остается до конца не решенным вопрос о точности позиционирования захватных устройств, которая во многом определяется кинематической точностью промышленного робота, в частности, ошибками основного его модуля – руки с захватным устройством. Вследствие этого представляется целесообразным вначале рассмотреть вопрос об определении линейных и угловых погрешностей захватных устройств промышленных роботов с рекуперацией энергии, имеющих, как правило, агрегатно-модульную компоновку [4].

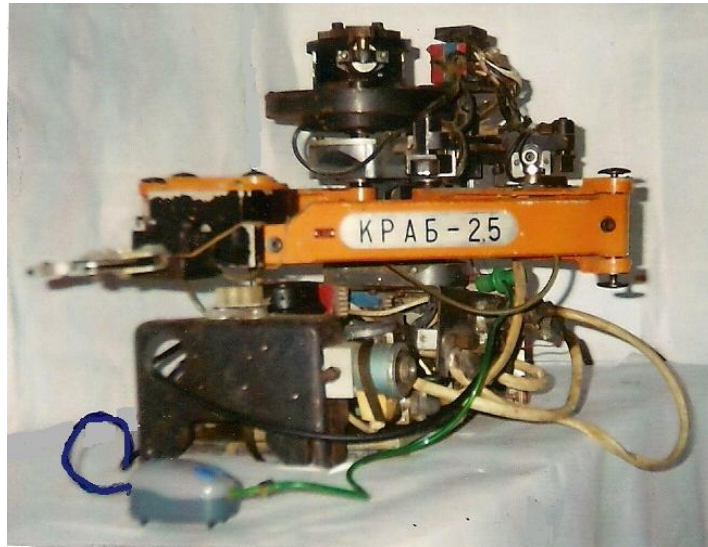


Рис. 1. Общий вид промышленного робота с рекуперацией энергии грузоподъемностью 2,5 кг

Указанные погрешности чаще всего возникают за счет ошибок обработки приводами манипулятора программных значений обобщенных координат, соответствующих заданному положению захватного устройства. При этом под программными значениями обобщенных координат манипулятора обычно понимают их значения, найденные для заданного положения захватного устройства [5]. Эти значения могут быть определены путем решения обратных задач о положениях манипулятора при анализе кинематики рабочих органов промышленного робота.

Пусть действительные значения обобщенных координат манипулятора робота с рекуперацией энергии отличаются от программных на величину  $\Delta q_1$ . Если с захватным устройством связать систему координат, то ее заданное (программное) положение  $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$  будет отличаться от действительного ее положения  $O_{\mathcal{D}}X_{\mathcal{D}}Y_{\mathcal{D}}Z_{\mathcal{D}}$  на величину  $\Delta r$  (рис. 2).

Величину  $\Delta r = r_{\mathcal{D}} - r_{\Pi}$  называют линейной ошибкой манипулятора, а угол поворота  $\varphi$ , на который следует повернуть систему  $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ , чтобы сделать ее оси параллельными соответствующим осям системы  $O_{\mathcal{D}}X_{\mathcal{D}}Y_{\mathcal{D}}Z_{\mathcal{D}}$ , называют угловой ошибкой положения манипулятора. Такой поворот всегда возможен на основе известной теоремы Эйлера–Даламбера [6, 7]. Радиус-вектор  $r$  произвольной точки захватного устройства промышленного робота с рекуперацией энергии можно записать в виде

$$r = r(q_i), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $n$  – число степеней подвижности манипулятора.

Проинтегрировав выражение (1) по обобщенным координатам  $q_i$ , получают функцию

$$dr = \sum_{i=1}^n \frac{\partial r}{\partial q_i} dq_i. \quad (2)$$

Если заменить дифференциалы в функции (2) конечными приращениями, то можно найти линейную ошибку манипулятора  $\Delta r$ :

$$\Delta r = \sum_{i=1}^n \frac{\partial r}{\partial q_i} \Delta q_i, \quad (3)$$

где  $\Delta q_i$  – ошибки обобщенных координат.

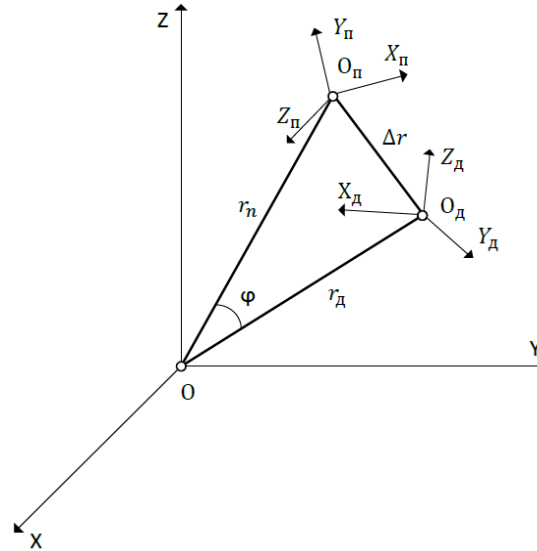


Рис. 2. Схема связей систем координат положения захватного устройства для определения ошибки позиционирования робота

Представляет практический интерес формула для определения линейной ошибки манипулятора промышленного робота с рекуперацией энергии, не содержащая операции дифференцирования. Для скорости произвольной точки захватного устройства справедлива следующая формула:

$$v = \sum_{j=1}^p \omega_j \times r_{Ij} + \sum_{i=1}^s v_i, \quad (4)$$

где  $j$  – номер вращательной пары;  $p$  – фактическое число вращательных пар в механизме манипулятора;  $i$  – номер поступательной пары;  $s$  – фактическое число поступательных пар в механизме манипулятора.

Но  $\omega_j = \frac{d\varphi_j}{dt} e_j$ , а  $v_i = \frac{dS_i}{dt} e_i$ , где  $e_j$  и  $e_i$  – орты осей вращательных и поступательных пар в механизме манипулятора. Тогда, используя формулу (4), можно записать:

$$dr = \sum_{j=1}^p \frac{d\varphi_j}{dt} e_j \times r_j + \sum_{i=1}^s \frac{dS_i}{dt} e_i,$$

или в конечной форме

$$\Delta r = \sum_{j=1}^p \Delta\varphi_j e_j + \sum_{i=1}^s \Delta S_i e_i, \quad (5)$$

где  $\Delta\varphi_j$  и  $\Delta S_i$  – соответственно ошибки во вращательных и поступательных парах механизма манипулятора.

Угловая ошибка положения твердого тела может быть определена матрицей ошибок [6], представляющей собой матрицу перехода от системы  $O_d X_d Y_d Z_d$  к системе  $O_{II} X_{II} Y_{II} Z_{II}$  посредством поворота на три угла Эйлера, которые считаются малыми. Так как такая матрица содержит значения трех углов Эйлера, то она не позволяет выразить угловую ошибку одной величиной. Вследствие этого необходимо найти векторную формулу для угловой ошибки захватного устройства манипулятора промышленного робота с рекуперацией энергии. Пусть линейная и угловая ошибки захватного устройства малы. Тогда на основании известного правила сложения малых поворотов твердого тела [6] можно записать выражение

$$\Delta\varphi = \sum_{i=1}^s \Delta q_i = \sum_{j=1}^p \Delta q_j e_j, \quad (6)$$

где  $\Delta q_j$  – ошибки обобщенной координаты во вращательной паре  $j$ ;  $e_j$  – орт оси шарнира  $j$ ; индекс  $j$  принимает значения номеров вращательных пар.

Формула (6) позволяет одной величиной  $\Delta\varphi$  определять угловую ошибку захватного устройства манипулятора. Так как векторы  $\Delta q_j$  и  $e_j$  заданы в системе звена  $j$ , то формуле (6) можно придать следующую форму:

$$\Delta\varphi = \sum_{j=1}^p L_{ij} \Delta q_j e_j, \quad (7)$$

где  $L_{ij}$  – матрица поворота третьего порядка, совмещающая по повороту систему  $OXYZ$  с системой  $O_j X_j Y_j Z_j$  звена  $j$ .

В общем виде матрица поворота  $L_{ij}$  может быть представлена следующим образом [5]:

$$L_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_j & -\sin \varphi_j \\ 0 & \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin \varphi_j \\ \cos \varphi_j \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Линейную ошибку положения захватного устройства манипулятора промышленного робота с рекуперацией энергии удобнее всего определять по формуле (5), не содержащей операции дифференцирования. В этом случае линейная ошибка положения центра масс захватного устройства промышленного робота  $\Delta r_C$  определится по формуле

$$\Delta r_C = \Delta\varphi_1(e_1 \times r_{1C}) + \Delta S_1 e_1 + \Delta S_2 e_2 + \Delta\varphi_2(e_2 \times r_{2C}) + \Delta\varphi_3 e_3 \times r_{3C} + \dots, \quad (9)$$

где  $r_{1C}, r_{2C}, r_{3C}, \dots$  – радиусы-векторы, определяющие положение центра масс захватного устройства  $C$  относительно пары 1, 2, 3, ...

Формула (9) получена с учетом того, что центр масс  $C$  располагается на оси вращения руки захватного устройства. В этом случае модуль линейной ошибки при использовании робота с рекуперацией энергии определится по формуле

$$\Delta r_C = \sqrt{\Delta r_{Cx}^2 + \Delta r_{Cy}^2 + \Delta r_{Cz}^2}, \quad (10)$$

где  $\Delta r_{Cx}, \Delta r_{Cy}, \Delta r_{Cz}$  – проекции вектора линейной ошибки  $\Delta r_C$  на декартовой оси координат.

В качестве декартовых осей координат при определении проекций линейной ошибки  $\Delta r_C$  обычно выбирают не неподвижные оси  $X, Y, Z$ , а оси, связанные с каким-либо звеном захватного устройства или промышленного робота вообще.

Линейная ошибка робота с рекуперацией энергии  $\sum \Delta S$ , зависящая от неточности установки и ошибок при изготовлении шарниров звеньев захватного устройства, а также их износа в процессе эксплуатации, определяется по формуле

$$\Sigma \Delta S = \sum_{k=1}^m \Delta \varphi_k l_k j, \quad (11)$$

где  $l_k$  – размер звена захватного устройства промышленного робота, определенный вдоль орты  $j$ ;  $k$  – количество шарнирных соединений в конструкции захватного устройства.

Для определения полной линейной ошибки положения захватного устройства промышленного робота с рекуперацией энергии, согласно формулы (10), необходимо найти проекции всех составляющих ошибок на координатные оси, связанные с движущимися звеньями механизма, т.е. системой  $O_d X_d Y_d Z_d$  (рис. 2). Аналитически это можно осуществить, воспользовавшись, например, зависимостями вида [3]:

$$\begin{aligned} \Delta S_x &= \Delta S_C \times \Delta \varphi_j (l_{kx} - r_{Cx}) \sin \varphi_i - \Delta \varphi_i (l_{kx} + r_{Cx}) \sin \varphi_j; \\ \Delta S_y &= \Delta S_C \times \Delta \varphi_j [(l_{ky} + r_{Cy}) \cos \varphi_j - \Delta \varphi_i (l_{ky} - r_{Cy}) \sin \varphi_j]; \\ \Delta S_z &= \Delta S_C \times \Delta \varphi_j [(l_{kz} + r_{Cz}) \sin \varphi_j - \Delta \varphi_i (l_{kz} - r_{Cz}) \cos \varphi_j]. \end{aligned} \quad (12)$$

При определении угловой ошибки захватного устройства манипулятора  $\Delta \varphi$  можно использовать следующие матрицы, определяющие векторы угловых ошибок  $\Delta \varphi_i$ ,  $\Delta \varphi_j$  и  $\Delta \varphi_{ij}$  при движении руки робота в проекциях на принятые координатные оси:

$$\Delta \varphi_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta \varphi_k \end{bmatrix}; \quad \Delta \varphi_j = \begin{bmatrix} \Delta \varphi_k \cos \varphi_k \\ \Delta \varphi_k \sin \varphi_k \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \Delta \varphi_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_k \sin \varphi_k - \sin \varphi_k^2 \\ \cos \varphi_k^2 + \cos \varphi_k \sin \varphi_k \\ \cos \varphi_k \sin \varphi_k \end{bmatrix} \Delta \varphi_k. \quad (13)$$

В ходе исследования точности позиционирования промышленного робота с рекуперацией энергии было произведено моделирование его работы по приведенным в первой части статьи зависимостям. Динамическая модель рассматриваемого устройства представлена на рис. 3.

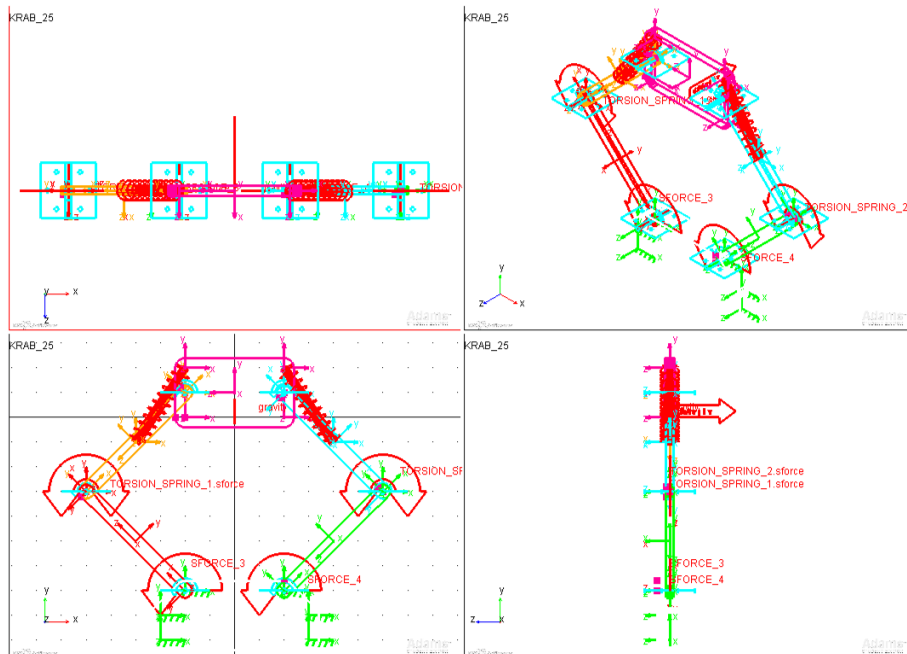


Рис. 3. Динамическая модель промышленного робота, типа «Краб 2,5»

Общая постановка задачи моделирования, задание элементов модели и условий их связи проводилась по методике, аналогичной изложенной в [3]. В качестве материала конструктивных элементов механизма была принята сталь. Элементы рычажного механизма соединялись при помощи шарниров Revolute joint, в двух из которых находились по одному торсиону, моделируемому через TORSION\_SPRING\_2 и работающему в каждую сторону с жесткостью 50 Н мм/град.

В верхней части механизма звенья, соединенные с рабочим органом, оснащались пружинами SPRING\_2, жесткостью  $2,2 \cdot 10^{-2}$  Н мм каждая – для обеспечения стабилизации продольного перемещения рабочего органа при работе механизма. При расчете учитывались как геометрические параметры модели, так и весовые. Масса звеньев, типа link, составляла 0,95 кг. Масса исполнительного органа с деталью составляла 4,7 кг. Масса упругих элементов в расчетах не учитывалась. К двум из них приводились моменты от двигателя SFORCE\_3 и SFORCE\_4. В ходе процесса моделирования кинематики работы рычажного механизма было исследовано изменение положения центра масс исполнительного органа с деталью во времени, представленное на рис. 4.

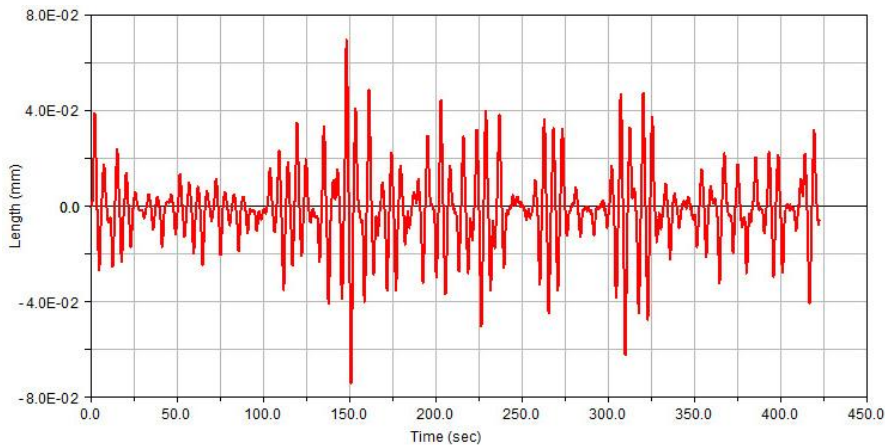


Рис. 4. Изменение положения центра масс рабочего органа рычажного механизма во времени

Выполненные исследования точности позиционирования захватного устройства позволили сформулировать практические конструкторско-технологические рекомендации по повышению точности позиционирования промышленного робота с рекуперацией энергии грузоподъемностью 2,5 кг. Основные из них направлены на уменьшение числа шарнирных соединений в конструктивном исполнении модулей промышленного робота и повышение износостойкости всех деталей трибосистем за счет создания на их поверхностях функциональных многокомпонентных слоев [8–10]. В результате была обеспечена точность позиционирования захватного устройства промышленных роботов с рекуперацией энергии при максимальном вылете руки и производительностью 25 рабочих ходов в минуту, равная  $\pm 0,08$  мм, что оказало существенное влияние на точность размеров деталей, получаемых холодной листовой штамповкой.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новицкий О.Е., Литовченко А.П., Шишков В.С., Бутенко В.И. Промышленные роботы с рекуперацией энергии // Механизация и автоматизация производства. – 1989. – № 2. – С. 6-8.

2. *Бутенко В.И.* Повышение надежности и эффективности робототехнических устройств атомных реакторов // *Материалы 14-го Международного науч.-практич. семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы».* – Донецк – Таганрог, 2013. – Т. 3. – С. 44-47.
3. *Бутенко В.И., Дуров Д.С., Шаповалов Р.Г.* Численное моделирование работы рычажного механизма при конструировании промышленных роботов с рекуперацией энергии // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 1 (150). – С. 174-180.
4. *Бутенко В.И.* Динамический мониторинг роботизированных станков в автоматизированном производстве // *Материалы 11-го Международного науч.-практич. семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы».* – Таганрог – Донецк, 2010. Кн. 3. – С. 58-80.
5. *Воробьев Е.И., Козырев Ю.Г., Царенко В.И.* Промышленные роботы агрегатно-модульного типа. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
6. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. – М.: Физматгиз, 1971. – 632 с.
7. *Гернет М.М.* Курс теоретической механики: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1987. – 344 с.
8. *Бутенко В.И.* Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с.
9. *Бутенко В.И.* Управление нанотрибологическими характеристиками поверхностей тяжело нагруженных опор и подшипников скольжения. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 385 с.
10. *Бутенко В.И., Дуров Д.С., Шаповалов Р.Г.* Научно-технологические технологии создания высокоресурсных деталей машин. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – 404 с.

## REFERENCES

1. *Novitskiy O.E., Litovchenko A.P., Shishkov V.S., Butenko V.I.* Promyshlennyye roboty s rekuperatsiyey energii [Industrial robots with energy recovery], *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva* [Mechanization and automation of production], 1989, No. 2, pp. 6-8.
2. *Butenko V.I.* Povysheniye nadezhnosti i effektivnosti robototekhnicheskikh ustroystv atomnykh reaktorov [Improving the reliability and efficiency of robotic devices for nuclear reactors], *Materialy 14-go Mezhdunarodnogo nauchno-praktich. seminara «Praktika i perspektivy razvitiya partnerstva v sfere vysshey shkoly»* [The proceedings of the 14<sup>th</sup> International scientific-practical seminar "the Practice and prospects of partnership in the sphere of higher education]. Donetsk – Taganrog, 2013, Vol. 3, pp. 44-47.
3. *Butenko V.I., Durov D.S., Shapovalov R.G.* Chislennoye modelirovaniye raboty rychazhnogo mekhanizma pri konstruirovanii promyshlennykh robotov s rekuperatsiyey energii [Numerical modeling of the lever mechanism when designing industrial robots with energy recovery], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 1 (150), pp. 174-180.
4. *Butenko V.I.* Dinamicheskyy monitoring robotizirovannykh stankov v avtomatizirovannom proizvodstve [Dynamic monitoring of robotic machines in automated production], *Materialy 11-go Mezhdunarodnogo nauch.-praktich. seminara «Praktika i perspektivy razvitiya partnerstva v sfere vysshey shkoly»* [Materials 11-th International scientific-practical seminar "the Practice and prospects of partnership in the sphere of higher education]. Taganrog – Donetsk, 2010. Kn. 3, pp. 58-80.
5. *Vorob'ev E.I., Kozыrev Yu.G., Tsarenko V.I.* Promyshlennyye roboty agregatno-modul'nogo tipa [Industrial robots aggregate module type]. Moscow: Mashinostroeniye, 1988, 240 p.
6. *Lur'e A.I.* Analiticheskaya mekhanika [Analytical mechanics]. Moscow: Fizmatgiz, 1971, 632 p.
7. *Gernet M.M.* Kurs teoreticheskoy mekhaniki [The course of theoretical mechanics]: Uchebnyk dlya vuzov [Textbook for high schools]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 344 p.
8. *Butenko V.I.* Struktura i svoystva poverkhnostnogo sloya detaley tribosistem [Structure and properties of the surface layer of tribosystems]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2012, 367 p.
9. *Butenko V.I.* Upravleniye nanotribologicheskimi kharakteristikami poverkhnostey tyazhelo nagruzhennykh opor i podshipnikov skol'zheniya [Management nanotribology characteristics of the surfaces of heavily loaded bearings and friction bearings]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011, 385 p.

10. *Butenko V.I., Durov D.S., Shapovalov R.G.* Naukoemkie tekhnologii sozdaniya vysokoresursnykh detaley mashin [High-tech technology to create high-efficiency machine parts]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2014, 404 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор О.А. Полушкин.

**Бутенко Виктор Иванович** – Южный федеральный университет; e-mail: mkk@egf.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел. +78634376122; кафедра механики; профессор.

**Дуров Дмитрий Сергеевич** – кафедра механики; зав. кафедрой.

**Шаповалов Роман Григорьевич** – кафедра механики; доцент.

**Butenko Victor Ivanovich** – Southern Federal University; e-mail: mkk@egf.tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371622; the department of mechanics; dr. of eng. sc.; professor.

**Durov Dmitry Sergeyeovich** – the department of the mechanics; head of department; associate professor.

**Shapovalov Roman Grigoryevich** – the department of mechanics; associate professor.

УДК 621.1

**Н.И. Мережин, М.Н. Максимов, А.А. Легин**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ РЕЛЬСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ**

*Для более надежного обнаружения дефектов в рельсах разработана система намагничивания для магнитных каналов вагонов-дефектоскопов и дефектоскопных автомотрис. Разработанная и изготовленная система намагничивания в отличие от имеющихся аналогов, содержащих мощные электромагниты постоянного тока, содержит современные композитные постоянные магниты большой силы. Использование постоянных магнитов существенно уменьшают массу и габариты системы намагничивания. Кроме того, разработанная система не потребляет электрической энергии. Все это в совокупности приводит к существенной экономии эксплуатационных расходов. Приведены результаты испытаний разработанной системы намагничивания в статическом и динамическом режиме. Статические испытания проводились на испытательном стенде для определения оптимальных конструктивных параметров системы. Исследовалось влияние таких параметров, как: толщина ярма, длина намагничивающей системы, количество магнитов и их взаимное расположение на каждом полюсе. Проведенные испытания позволили оптимизировать конструкцию системы намагничивания по основным техническим показателям: намагничивающей силе, массе и габаритам. Динамические испытания проводились в магнитном вагоне-дефектоскопе совместно с существующей системой намагничивания на испытательном участке железной дороги с уложенными дефектами. Проведенные испытания показали эффективную работу разработанной системы намагничивания. Несмотря на существенно меньшие габариты, разрабатываемая система намагничивания позволяет сильнее промагнитить рельс, что, в свою очередь, приводит к большей чувствительности всего магнитного вагона-дефектоскопа и повышению выявляемости дефектов.*

*Дефект; дефектоскопия; магнитная дефектоскопия; система намагничивания; автоматизация обнаружения дефектов; вагон-дефектоскоп.*