



www.volsu.ru

DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2023.1.4>

УДК 53.082  
ББК В213.3

Дата поступления статьи: 31.08.2022

Дата принятия статьи: 05.02.2023



## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ ТРОСОВ<sup>1</sup>

**Игорь Владимирович Меркурьев**

Доктор технических наук, заведующий кафедрой робототехники и мехатроники,  
динамики и прочности машин,  
Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»  
merkuryeviv@ya.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7682-2228>  
ул. Красноказарменная, 17, 111250 г. Москва, Российская Федерация

**Гасан Русланович Сайпулаев**

Ассистент кафедры робототехники и мехатроники, динамики и прочности машин,  
Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»  
saypulaevgr@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9827-360X>  
ул. Красноказарменная, 17, 111250 г. Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В целях повышения безопасности грузоподъемного оборудования поставлена задача создания нового робототехнического комплекса для автоматизированного проведения исследования технического состояния и несущей способности стальных тросов в труднодоступных и опасных для персонала местах. Разработана новая математическая модель робототехнического комплекса, описывающая управляемое движение магнитного дефектоскопа для выполнения технологических процедур неразрушающего контроля стальных тросов. Разработан алгоритм оценки управляющих моментов, необходимых для реализации программного движения. Проведено численное моделирование движения, соответствующего режиму приближения головок магнитных дефектоскопов к стальному канату. Приведены графики тягово-скоростных

характеристик и диаграмма нагрузки приводов, обеспечивающих программное перемещение звеньев пантографного механизма. Представленные в статье результаты могут быть использованы для расчета параметров силовой части электрогидравлических приводов, входящих в состав робототехнического устройства. Исследована точность выполнения задач дефектоскопии с учетом динамики исполнительных и измерительных систем комплекса.

**Ключевые слова:** магнитная дефектоскопия, робот, привод, механика, математическая модель.

### **Введение**

Разработка математических методов прогнозирования состояния сложных технических систем является актуальной задачей, решение которой позволяет обеспечить безопасность функционирования производства. Необходимость контроля технического состояния стального тросового оборудования связана с повышенными требованиями к безопасности эксплуатации на протяжении длительного периода в изменяющихся условиях функционирования. Методы и технические средства для контроля физико-механических свойств конструкционных материалов основаны на различных физических принципах. Решение задач диагностики с использованием оборудования магнитной и вихретоковой дефектоскопии представлено в работах [2; 3].

С использованием методов неразрушающего контроля оценивают наличие коррозии, дефектов и износа несущих элементов конструкций, проводят сравнение измеренных параметров с расчетными значениями. Помимо задач, связанных с разработкой методов и алгоритмов неразрушающего контроля, множество опубликованных работ посвящены проблемам разработки и улучшению приборов для оценки дефектов стальных канатов [1; 2; 4], а также автоматизации процедуры неразрушающего контроля [5–9].

Система периодического и непрерывного мониторинга состояния дает возможность сократить расходы на техническое обслуживание и проверку несущей способности стальных тросов, обеспечивая при этом повышенную безопасность функционирования. В измерительную часть системы мониторинга технического состояния включаются прецизионные диагностические датчики, особенностью которых является высокая степень интеграции механических чувствительных элементов с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами управления [5; 6].

Таким образом, проведенный анализ развития технологии неразрушающего контроля, робототехники, информационных и управляющих систем показывает актуальность создания перспективных видов автоматического диагностического оборудования.

Применение автоматизированного робототехнического комплекса для периодического мониторинга технического состояния тросового оборудования позволит сократить время простоя, увеличить безопасность эксплуатации основного шахтного, бурового, сталеплавильного подъемного оборудования.

### **1. Постановка задачи**

В дефектоскопе компании Интрон для диагностирования каната реализован магнитный вид неразрушающего контроля. Дефектоскоп применяют при периодическом мо-

нитинге технического состояния стального каната, подверженного эксплуатационным, механическим, термическим и климатическим воздействиям в процессе эксплуатации.

Для проведения диагностирования стального каната робототехнический комплекс должен из заданного начального положения установить две половины магнитных головок на стальном канате (рис. 1), по окончании процедуры диагностирования переместить оборудование в начальное положение.



Рис. 1. Установка магнитного дефектоскопа стального каната

Необходимо обеспечить минимальный объем работ по техническому обслуживанию и автономность работы робототехнического комплекса при диагностировании каната. Управление движением скелетно-приводной системы должно иметь возможность ручного дублирования функций перемещения и фиксации. Предполагается капсульное исполнение приводных модулей, исключающее попадание в них воды, льда, грязи, пыли и т. п.

## 2. Разработка математической модели робототехнического комплекса

Анализ технических требований и возможных способов перемещения блоков головок позволяет выбрать плоскостной многосвязный механизм скелетно-приводной системы. Обеспечение автоматического поиска троса в условиях его произвольного перемещения в пределах габаритов люка с последующим захватом и гарантированным зазором между поверхностями корпуса головок и тросом осуществляется в результате единого управляемого и синхронного движения обоих блоков прибора. Возможное и многократно опробованное схмотехническое решение — применение плоских пантографных механизмов (см. рис. 2).

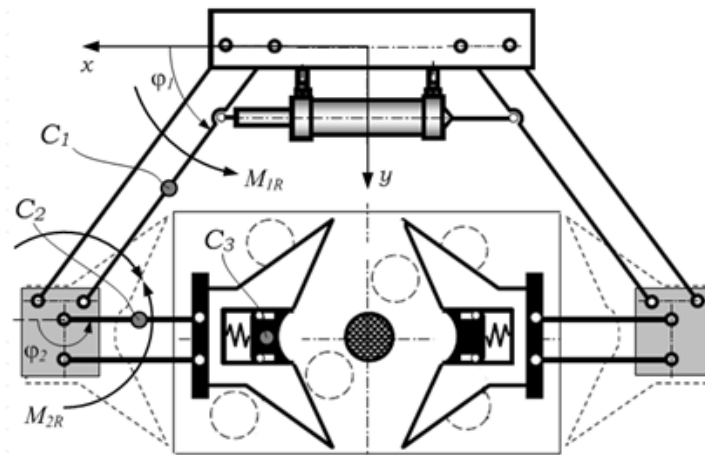


Рис. 2. Конструкционная схема пантографного механизма

Для перемещения блоков прибора из технологической ниши в активную зону предусматривается система автоматического управления движением, включающая в себя измерительную систему датчиков положения звеньев механизма и положение движущегося троса.

Для составления уравнений динамики робототехнического комплекса воспользуемся формализмом Лагранжа. Введем обозначения:  $C_1, C_2$  — центры масс соответствующих звеньев механизма;  $C_3$  — центр масс одной из головок дефектоскопа;  $\varphi_1, \varphi_2$  — углы поворота соответствующих звеньев;  $M_{1R}, M_{2R}$  — управляющие моменты в сочленениях механизма. Все углы поворотов звеньев механизма отсчитываются от горизонтальной оси  $x$  против часовой стрелки.

Уравнения Лагранжа 2-го рода, описывающие динамику системы тел, имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} = - \frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{q}} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\mathbf{q}}} + \mathbf{Q}_M, \quad (1)$$

где  $\mathbf{q} = \left( \varphi_1, \varphi_2 \right)^T$  — вектор обобщенных координат;  $\dot{\mathbf{q}} = \left( \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2 \right)^T$  — обобщенные скорости;  $T, \Pi$  — кинетическая и потенциальная энергии системы ( $\Pi = 0$ , так как движение механизма происходит в горизонтальной плоскости и действие сил тяжести не влияет на движение в рассматриваемой плоскости);  $\Phi$  — диссипативная функция Рэлея;  $\mathbf{Q}_M$  — обобщенные силы, соответствующие управляющим моментам.

Выпишем выражение для кинетической энергии:

$$T = \frac{1}{2} \left( m_1 V_{C1}^2 + J_1 \dot{\varphi}_1^2 + m_2 V_{C2}^2 + J_2 \dot{\varphi}_2^2 + m_3 V_{C3}^2 \right), \quad (2)$$

где  $m_1, m_2, m_3$  — массы первого и второго звеньев механизма и цилиндрической головки прибора;  $J_1, J_2$  — моменты инерции первого и второго звеньев механизма;  $V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}$  — модули скоростей точек  $C_1, C_2, C_3$ .

В соответствии с кинематической схемой, выражения для проекций скоростей  $V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}$  на оси  $x, y$  можно записать в виде:

$$\begin{aligned} V_{C1x} &= -\dot{\varphi}_1 a_1 \sin \varphi_1, & V_{C1y} &= -\dot{\varphi}_1 a_1 \cos \varphi_1, \\ V_{C2x} &= -\dot{\varphi}_1 l_1 \sin \varphi_1 - \dot{\varphi}_2 a_2 \sin \varphi_2, & V_{C2y} &= \dot{\varphi}_1 l_1 \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_2 a_2 \cos \varphi_2, \\ V_{C3x} &= -\dot{\varphi}_1 l_1 \sin \varphi_1 - \dot{\varphi}_2 l_2 \sin \varphi_2, & V_{C3y} &= \dot{\varphi}_1 l_1 \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_2 l_2 \cos \varphi_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $l_1, l_2$  — длины первого и второго звеньев механизма;  $a_1, a_2$  — расстояния до центров масс для первого и второго звена.

Применяя формализм Лагранжа, вычисляем левую часть уравнений (1) с учетом выражений (2) и (3). В таком случае получим:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{A}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}^2, \quad (4)$$

где введены обозначения для матриц инерционных и кориолисовых сил:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} J_{1R} & J_{12R} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ J_{12R} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & J_{2R} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 & J_{12R} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \\ -J_{12R} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) & 0 \end{bmatrix},$$

где  $\ddot{\mathbf{q}} = (\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2)^T$ ,  $\dot{\mathbf{q}}^2 = (\dot{\varphi}_1^2, \dot{\varphi}_2^2)^T$ .

Приведенные моменты инерции имеют вид:

$$J_{1R} = J_1 + m_1 a_1^2 + (m_2 + m_3) l_1^2, \quad J_{2R} = J_2 + m_2 a_2^2 + m_3 l_2^2, \quad J_{12R} = l_1 (m_2 a_2 + m_3 l_2). \quad (6)$$

Далее выпишем выражения для диссипативной функции (в силу линейности сил вязкого трения в шарнирах) и обобщенные силы  $\mathbf{Q}_M$ :

$$\Phi = \frac{1}{2} (\mu_1 \dot{\varphi}_1^2 + \mu_2 \dot{\varphi}_2^2),$$

$$\mathbf{Q}_M = \begin{pmatrix} M_{1R} - M_{2R} & M_{2R} \end{pmatrix}^T, \quad (7)$$

где  $\mu_1, \mu_2$  — коэффициенты диссипации.

Тогда правая часть уравнений движения (1) с учетом выражений (7) примет вид:

$$\mathbf{Q}_M - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} M_{1R} - M_{2R} - \mu_1 \dot{\varphi}_1 \\ M_{2R} - \mu_2 \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Подставляя выражения (4), (5) и (8) в уравнения Лагранжа (1), получим систему из двух дифференциальных уравнений, описывающих нелинейную динамику рассматриваемой модели пантографного механизма:

$$\begin{aligned} J_{1R} \ddot{\varphi}_1 + J_{12R} [\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)] &= M_{1R} - M_{2R} - \mu_1 \dot{\varphi}_1, \\ J_{2R} \ddot{\varphi}_2 + J_{12R} [\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)] &= M_{2R} - \mu_2 \dot{\varphi}_2. \end{aligned} \quad (9)$$

Полученные уравнения движения (9) будем использовать для оценки энергозатрат, которые необходимы для осуществления программного движения.

### 3. Выбор программного движения и алгоритм оценки управляющих воздействий

Для оценки управляющих моментов будем использовать следующий алгоритм:

- Задаем программное движение звеньев — зависимости углов  $\varphi_1^d(t), \varphi_2^d(t)$ .

- Вычисляем угловые скорости  $\dot{\varphi}_1^d(t)$ ,  $\dot{\varphi}_2^d(t)$  и угловые ускорения  $\ddot{\varphi}_1^d(t)$ ,  $\ddot{\varphi}_2^d(t)$ .
- Из второго уравнения динамики (9) при подстановке программного движения вычисляем управляющий момент  $M_{2R}^d(t)$  на программном движении.
- Из первого уравнения динамики (9) при подстановке программного движения и момента вычисляем управляющий момент  $M_{1R}^d(t)$  на программном движении.

Рассмотрим частный случай программного движения. Предполагая использовать робототехнический комплекс для подвода (соединения) и отвода (разъединения) магнитных головок дефектоскопа в качестве программного движения рассмотрим частный случай движения, когда второе звено механизма выдерживает постоянную ориентацию (то есть  $\varphi_2(t) = 180^\circ$ ,  $\dot{\varphi}_2(t) = 0$ ,  $\ddot{\varphi}_2(t) = 0$ ) вдоль оси  $x$ .

При таком движении уравнения динамики сводятся к одному нелинейному уравнению второго порядка и выражению для момента  $M_{2R}$ :

$$\begin{aligned} J_{1R}\ddot{\varphi}_1 + J_{12R}(-\ddot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_1) &= M_{1R} - \mu_1 \dot{\varphi}_1, \\ M_{2R} &= J_{12R}(-\ddot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_1). \end{aligned} \quad (10)$$

При подводе магнитных головок угол изменяется от начального значения  $\varphi_1(0)$  (соответствующего разъединенным головкам дефектоскопа, убраным в производственные ниши) до конечного значения  $\varphi_1(T)$  (соответствующего моменту соединения магнитных головок при охватывании стального каната). При этом в качестве закона изменения угла возьмем «плавную» кривую зависимость, описываемую формулой:

$$\varphi_i(t) = \varphi_i(0) + (\varphi_i(T) - \varphi_i(0)) \left[ \frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin \left( \frac{2\pi t}{T} \right) \right]. \quad (11)$$

Здесь  $T$  — время движения.

В силу симметрии операций подвода и отвода магнитных головок к канату далее проведем моделирование только для одного из этих движений. В качестве примера рассмотрим режим подвода головок.

#### 4. Результаты численного математического моделирования движения

В качестве примера рассмотрим следующие числовые параметры математической модели:  $J_{1R} = 26,6667$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_{2R} = 3,4667$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_{12R} = 9,0$  кг·м<sup>2</sup>,  $\mu_1 = \mu_2 = 1,2 \cdot 10^{-3}$  Н·м·с. При этом примем следующие значения параметров, характеризующих программное движение:  $\varphi_1(0) = 30^\circ$ ,  $\varphi_1(T) = 75^\circ$ ,  $T = 3$  с. Проведем численное моделирование уравнений (10) в соответствии с алгоритмом, приведенным выше, с использованием пакета символьной математики *Wolfram Mathematica*.

По результатам моделирования построим графики зависимостей от времени для обобщенных координат, скоростей, ускорений и управляющих моментов (см. рис. 3).

По графику, представленному на рисунке 3г, можно оценить максимальные значения моментов, которые должны развивать приводы. Указанные величины можно использовать для расчета силовой части системы приводов.

Для демонстрации тягово-скоростных характеристик привода приведем диаграммы нагрузки (см. рис. 4).

Полученная математическая модель и диаграмма нагрузки позволили аналитически рассчитать энергетические и динамические характеристики автономной мобильной платформы, что позволяет рационально выбрать параметры электрогидравлического привода.

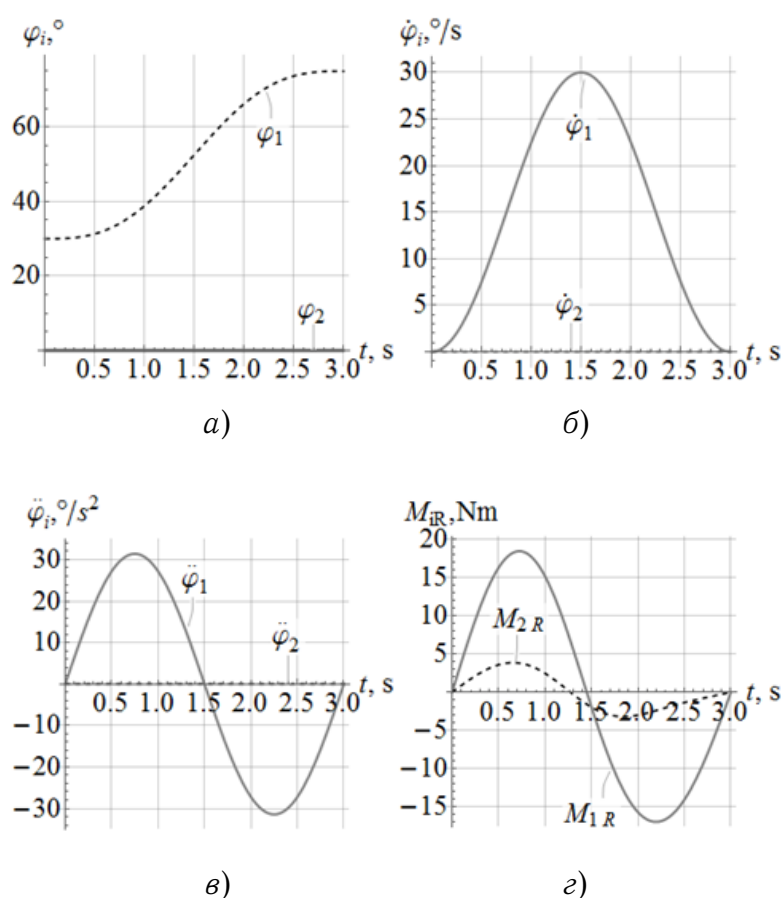


Рис. 3. Углы поворота, угловые скорости, угловые ускорения и управляющие моменты звеньев робототехнического комплекса при подводе головок к канату

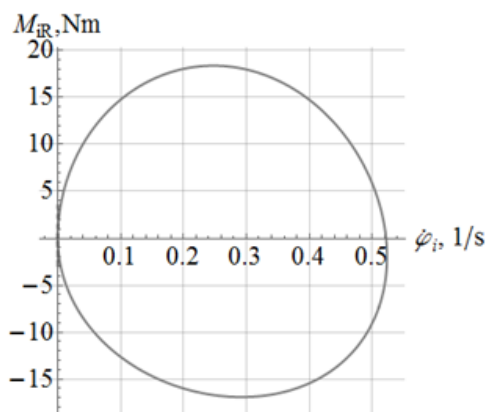


Рис. 4. Диаграмма нагрузки для привода первого звена пантографного механизма

### Заключение

Предложен новый автономный робототехнический комплекс, представляющий собой управляемое многозвенное устройство с целевым оборудованием магнитной дефектоскопии стальных тросов шахтного подъемного оборудования.

Разработанная математическая модель движения робототехнического комплекса

описывает кинематику и динамику многозвенного механизма при выполнении технологических процедур дефектоскопии.

Проведенное численное моделирование движения робототехнического комплекса использовано для расчета программного движения и управления движением звеньев комплекса, построения экспериментального прототипа.

### **ПРИМЕЧАНИЕ**

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта «Разработка прототипа нового автономного мобильного робота для решения задач мониторинга технического состояния тросового оборудования» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020–2022 годах.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анализ эксплуатационной надежности грузовых канатов заливочных кранов сталеплавильного производства / В. Ю. Волоховский, А. Н. Воронцов, И. И. Шпаков, В. В. Гончаров // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 7–16.

2. Магнитная дефектоскопия — эффективный инструмент мониторинга технического состояния проводов и грозотросов воздушных линий электропередачи / В. Ю. Волоховский, А. Н. Воронцов, Д. В. Сухоруков, А. Р. Рудяк // Электрические станции. — 2019. — № 12 (1061). — С. 28–37.

3. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин / М. М. Матлин, А. И. Мозгунова, Е. Н. Казанкина, В. А. Казанкин. — М. : Инновационное машиностроение, 2019. — 247 с.

4. Мониторинг технического состояния талевых канатов буровых установок эксплуатационного и разведочного бурения нефтяных и газовых скважин: технология, эффективность, перспективы / Д. А. Слесарев, О. П. Потехин, И. И. Шпаков, В. Ю. Волоховский, А. Н. Воронцов // Безопасность труда в промышленности. — 2018. — № 6. — С. 13–22.

5. Разработка эскизного проекта робототехнического комплекса для решения задач мониторинга технического состояния тросового оборудования / И. В. Апанасевич, В. В. Кузнецов, Г. Р. Сайпулаев, И. В. Меркурьев // Технологии будущего : сб. тез. IV Нац. науч. техн. конф. — М. : Изд-во ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», 2021. — С. 81–82.

6. Роботизированное устройство для автоматизации контроля состояния тросов в горнодобывающей промышленности / И. В. Меркурьев, Г. Р. Сайпулаев, И. В. Орлов, Т. Ч. Чан // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021 : сб. тез. VIII Междунар. науч.-практ. конф. — СПб. : Санкт-Петербургский горный университет, 2021. — С. 66–68.

7. Slesarev, D. Defect identification based on wavelet decomposition for MFL non-destructive inspection of steel plates / D. Slesarev // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. — 2021. — Vol. 63 (3). — P. 146–150.

8. Mita, A. Design Strategy of Structural Health Monitoring System Consisting of Four Sensors for Tall Buildings / A. Mita, K. Hirai, S. Ozawa // Proc. 8<sup>th</sup> European Workshop on SHM, EWSHM 2016. — Bad Breisig : NDT.net, 2016. — Vol. 1. — P. 2643–2650.

9. High-Precision Smart System on Accelerometers and Inclinometers for Structural Health Monitoring: Development and Applications / S. Konovalov, D. Mayorov, Y. Ponomarev, T. Soloveva // Proc. 2018 12<sup>th</sup> France-Japan and 10<sup>th</sup> Europe-Asia Congress on Mechatronics, Mecatronics. — Piscataway : IEEE, 2018. — P. 52–57. — DOI: <https://doi.org/10.1109/MECATRONICS.2018.8495730>



## REFERENCES

1. Volokhovskiy V.Yu., Vorontsov A.N., Shpakov I.I., Goncharov V.V. Analiz ekspluatatsionnoy nadezhnosti gruzovykh kanatov zalivochnykh kranov staleplavilnogo proizvodstva [Magnetic Flaw Detection Is an Effective Tool for Monitoring the Technical Condition of Wires and Ground Wires of Overhead Power Lines]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2020, no. 5, pp. 7-16.
2. Volokhovskiy V.Yu., Vorontsov A.N., Sukhorukov D.V., Rudyak A.R. Magnitnaya defektoskopiya — effektivnyy instrument monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya provodov i grotosov vozduzhnykh liniy elektroperedachi [Magnetic Flaw Detection Is an Effective Tool for Monitoring the Technical Condition of Wires and Ground Wires of Overhead Power Lines]. *Elektricheskie stantsii*, 2019, no. 12 (1061), pp. 28-37.
3. Matlin M.M., Mozgunova A.I., Kazankina E.N., Kazankin V.A. *Metody nerazrushayushchego kontrolya prochnostnykh svoystv detaley mashin* [Methods of Non-Destructive Testing of Strength Properties of Machine Parts]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 247 p.
4. Slesarev D.A., Potekhin O.P., Shpakov I.I., Volokhovskiy V.Yu., Vorontsov A.N. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya talevykh kanatov burovykh ustanovok ekspluatatsionnogo i razvedochnogo bureniya neftyanykh i gazovykh skvazhin: tekhnologiya, effektivnost, perspektivy [Monitoring of Technical Condition of the Wire Ropes of Drilling Rigs for Production and Exploratory of Oil and Gas Wells: Technology, Efficiency, Prospects]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2018, no. 6, pp. 13-22.
5. Apanasevich I.V., Kuznetsov V.V., Saypulaev G.R., Merkur'yev I.V. Razrabotka eskiznogo proekta robototekhnicheskogo kompleksa dlya resheniya zadach monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya trosovogo oborudovaniya [Development of a Preliminary Design of a Robotic Complex for Solving the Problems of Monitoring the Technical Condition of Cable Equipment]. *Tekhnologii budushchego: sb. tez. IV Nats. nauch. tekhn. konf.* Moscow, Izd-vo FGBOU VPO «NIU «MEI» Publ., 2021, pp. 81-82.
6. Merkur'yev I.V., Saypulaev G.R., Orlov I.V., Chan T.Ch. Robotizirovanoe ustroystvo dlya avtomatizatsii kontrolya sostoyaniya trosov v gornodobyvayushchey promyshlennosti [Robotic Device for Automating Rope Condition Monitoring in the Mining Industry]. *Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroeniya i elektromekhaniki: IPDME-2021: sb. tez. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 2021, pp. 66-68.
7. Slesarev D. Defect Identification Based on Wavelet Decomposition for MFL Non-Destructive Inspection of Steel Plates. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2021, vol. 63 (3), pp. 146-150.
8. Mita A., Hirai K., Ozawa S. Design Strategy of Structural Health Monitoring System Consisting of Four Sensors for Tall Buildings. *Proc. 8<sup>th</sup> European Workshop on SHM, EWSHM 2016*. Bad Breisig, NDT.net, 2016, vol. 1, pp. 2643-2650.
9. Konovalov S., Mayorov D., Ponomarev Y., Soloveva T. High-Precision Smart System on Accelerometers and Inclometers for Structural Health Monitoring: Development and Applications. *Proc. 2018 12<sup>th</sup> France-Japan and 10<sup>th</sup> Europe-Asia Congress on Mechatronics, Mechatronics*. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 52-57. DOI: <https://doi.org/10.1109/MECATRONICS.2018.8495730>

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL  
OF A ROBOTIC COMPLEX FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING  
OF STEEL CABLES**

**Igor V. Merkuriev**

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Robotics, Mechatronics,  
Dynamics and Machine Strength,  
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"  
merkuryeviv@ya.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7682-2228>  
Krasnokazarmennaya St, 17, 111250 Moscow, Russian Federation

**Gasan R. Saypulaev**

Assistant, Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Machine Strength,  
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"  
saypulaevgr@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9827-360X>  
Krasnokazarmennaya St, 17, 111250 Moscow, Russian Federation

**Abstract.** In order to improve the safety of lifting equipment, the task was set to create a new robotic complex for automated research of the technical condition and bearing capacity of steel cables in places that are difficult to access and dangerous for personnel. A new mathematical model of a robotic complex has been developed that describes the controlled movement of a magnetic flaw detector for performing technological procedures for non-destructive testing of steel cables. A mathematical model of the dynamics of the system is obtained using the Lagrange formalism. An algorithm for evaluating the control moments necessary for the implementation of programmed motion has been developed. Numerical simulation of the motion corresponding to the mode of approaching the magnetic flaw detector heads to the steel rope has been carried out. The graphs of the traction-speed characteristics and load diagrams of the drives providing the programmed movement of the links of the pantograph mechanism are presented. The results presented in this paper can be used to calculate the parameters of the power section of the electro-hydraulic drives included in the robotic device. The accuracy of performing flaw detection tasks is studied, taking into account the dynamics of the executive and measuring systems of the complex.

**Key words:** magnetic flaw detection, robot, drive, mechanics, mathematical model.