

Научная статья  
УДК 621.86  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-512-523>  
EDN: NDLRWQ



## АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ КРАНОВЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

М.Ю. Йылмаз ✉, С.Д. Иванов  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия  
✉ ответственный автор  
[mihailsolovev287@gmail.com](mailto:mihailsolovev287@gmail.com)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Обоснована необходимость перехода от традиционных методов технического обслуживания к системам оперативного мониторинга, позволяющим выявлять дефекты в реальном времени. Поставлена задача повышения надежности крановых приводов через раннюю диагностику механических повреждений на основе анализа токов статора асинхронного двигателя. Доказана значимость исследования динамики переходных процессов для разработки эффективных диагностических алгоритмов.

**Материалы и методы.** Разработана математическая модель электромеханических процессов в системе координат  $\alpha$ - $\beta$ , учитывающая взаимное влияние момента сопротивления и электромагнитных характеристик двигателя. Модель параметризована на основе данных промышленных крановых приводов. Численное моделирование для исследования переходных процессов при скачкообразном изменении нагрузки выполнено в среде Wolfram Mathematica. Используются уравнения электрического баланса, магнитных потоков и механического движения, адаптированные для условий работы кранового оборудования.

**Результаты.** Установлено, что изменение механических условий работы привода проявляется в специфических изменениях параметров токов статора, таких как увеличение периода колебаний при сбросе нагрузки. Показано, что период колебаний тока статора уменьшается на 10% при наложении нагрузки и возрастает на 15% после ее снятия.

**Обсуждение и заключение.** Полученные результаты показывают возможности и ограничения для использования тока статора в качестве информативного параметра о работе кранового механизма для его диагностирования в реальном времени.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** асинхронный электродвигатель, динамические процессы, промышленная безопасность, математическое моделирование, крановые механизмы, дефекты привода, ток статора

Статья поступила в редакцию 07.06.2025; одобрена после рецензирования 04.07.2025; принята к публикации 22.08.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Йылмаз М.Ю., Иванов С.Д. Анализ переходных процессов в асинхронных двигателях крановых приводов для диагностики механических неисправностей // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 512-523. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-512-523>

© Йылмаз М.Ю., Иванов С.Д., 2025



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-512-523>

EDN: NDLRWQ

## ANALYSIS OF TRANSIENTS IN ASYNCHRONOUS MOTORS OF CRANE ACTUATORS FOR DIAGNOSTICS OF MECHANICAL FAULTS

Mikhail Y. Yilmaz ✉, Sergey D. Ivanov  
Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, Russia  
✉ corresponding author  
[mihailsolovev287@gmail.com](mailto:mihailsolovev287@gmail.com)

### ABSTRACT

**Introduction.** The need of transitioning from traditional maintenance methods to operational monitoring systems that enable real-time defect detection is proved. The task of improving the reliability of crane drives through early detection of mechanical damage based on analysis of asynchronous motor stator currents is set. The importance of studying the dynamics of transient processes for the development of effective diagnostic algorithms is shown.

**Materials and methods.** A mathematical model of electromechanical processes in the  $\alpha$ - $\beta$  coordinate system has been developed, taking into account the mutual influence of the resistance torque and the electromagnetic characteristics of the motor. The model is parameterized based on data from industrial crane drives. Numerical simulation for the study of transient processes during sudden load changes was performed in the Wolfram Mathematica environment. Equations of electrical balance, magnetic fluxes, and mechanical motion adapted for the operating conditions of crane equipment were used.

**Results.** It has been found that changes in the mechanical operating conditions of the drive are manifested in specific changes in the stator current parameters, such as an increase in the oscillation period when the load is released. It has been shown that the stator current oscillation period decreases by 10% when the load is applied and increases by 15% after it is removed.

**Discussion and conclusion.** The results obtained show the possibilities and limitations for using the stator current as an informative parameter to study the operation of the crane mechanism for its diagnostics in real time.

**KEYWORDS:** asynchronous electric motor, dynamic processes, industrial safety, mathematical modeling, crane mechanisms, drive defects, stator current

**The article was submitted: June 06, 2025; approved after reviewing: July 04, 2025; accepted for publication: August 22, 2025.**

**All authors have read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

**For citation:** Yilmaz M.Y., Ivanov S.D. Analysis of transients in asynchronous motors of crane actuators for diagnostics of mechanical faults. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 512-523. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-512-523>

© Yilmaz M.Y., Ivanov S.D., 2025



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасной работы грузо-подъемного оборудования остается важнейшей задачей современных исследований в сфере подъемно-транспортных технологий [1, 2, 3]. Особый интерес представляет возможность оценки технического состояния крановых механизмов через анализ электротехнических характеристик их приводных систем [4, 5, 6].

Ключевой проблемой в данной области является поддержание эксплуатационной готовности оборудования. Хотя традиционная система технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) доказала свою эффективность, ее результативность существенно зависит от качества планирования профилактических мероприятий. Как показывают исследования, современные подходы к планированию ТОиР не всегда обеспечивают необходимый уровень надежности<sup>1</sup> [7]. Данные по аварийности кранового оборудования подтверждают недостаточную эффективность существующих методов диагностики, применяемых при формировании графиков обслуживания [8, 9].

Актуальной задачей становится разработка систем оперативного мониторинга, позволяющих получать информацию о состоянии механизмов в реальном времени. Такие системы дают возможность оперативно корректировать графики ТОиР, что существенно повысит безопасность эксплуатации подъемно-транспортных машин (ПТМ). Предлагаемое решение направлено на непрерывный контроль технического состояния приводных систем между плановыми обслуживаниями [10, 11, 12]. Совершенствование системы ТОиР через оперативное выявление и устранение возникающих неисправностей в приводах и механизмах кранов позволит существенно повысить надежность ПТМ.

Известно о существовании методик и зарубежных технических средств контроля состояния электродвигателя, встроенных в преобразователи частоты [13, 14]. Применение таких средств ограничено единственным элементом механизма – электродвигателем, в то время как задачей проводимого исследования является расширение объекта диагностирования

до целого механизма, при этом электродвигатель используется в качестве источника первичной информации.

Зарубежные системы безопасности, используемые на кранах Kone Cranes, Liebherr и др., укомплектованы датчиками тока электродвигателя, однако применение их ограничено контролем запуска электродвигателя для безопасного управления тормозом. Из этого следует, что наступил момент, когда технические средства диагностики стали доступными для крановой отрасли, а эффективное их применение ограничено неразработанностью методик обработки первичной информации (в данном случае тока статора электродвигателя).

Цель исследования – разработка математической модели связи электрических и механических параметров асинхронного электродвигателя кранового привода.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках теоретического анализа взаимосвязь между параметрами дефекта и электрическими характеристиками может быть установлена через электромеханические зависимости<sup>2</sup>. Возникающие дефекты оказывают периодическое действие (выкрашивание зуба, проход стыка рельсов, увеличенный зазор в зубчатой передаче и др.) или плавно изменяющееся (изнашивание дорожки качения подшипника, увеличение промежутков контакта реборды колеса и головки рельса и др.). Второй тип нагрузки от дефекта может быть проанализирован как квазистатический режим в силу превышения периода действия нагрузки периода переходных процессов электрических параметров на несколько порядков. В ответ же на импульсную нагрузку электродвигатель оказывает демпфирующее действие, описываемое выражением (1):

$$M_{дв} = \Delta M e^{-\frac{t}{T}} + M_{стат}, \quad (1)$$

где  $\Delta M$  – добавочная величина изменения момента электродвигателя, Н·м;

$M_{стат}$  – статический момент двигателя, Н·м;

$e^{-\frac{t}{T}}$  – коэффициент демпфирования двигателя.

<sup>1</sup> Агейчева М.М. Учет реальных условий работы крана при расчете остаточного ресурса по данным регистратора параметров // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: электронный сборник статей по материалам СХХХI Студенческой международной научно-практической конференции, Новосибирск, 9 ноября 2023 года. Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью «Сибирская академическая книга», 2023. С. 85–92. EDN ECQRWT.

<sup>2</sup> Кувшинов А.А., Греков Э.Л. Теория электропривода. Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие для СПО. Саратов: Профобразование, 2020. 113 с. ISBN 978-5-4488-0563-9. EDN JJASTV.

Использование механических параметров для выявления дефектов имеет существенные ограничения, связанные с трудностями монтажа измерительных устройств и жесткими требованиями к их метрологическим характеристикам. Альтернативным решением является мониторинг электромеханических показателей. Современные исследования демонстрируют эффективность применения электрических параметров двигателя для решения задач ограничения грузоподъемности<sup>3,4</sup> [15, 16, 17] и регистрации параметров [18, 19]. Наиболее информативными показателями являются токовые характеристики ротора и статора, потребляемая активная мощность, параметры питающего напряжения и частота сети. Комплексный анализ динамики этих параметров открывает возможности для создания эффективной системы диагностики, способной идентифицировать и классифицировать различные типы повреждений.

Ток статора представляет собой комплексный показатель, интегрирующий как электрические, так и механические аспекты работы двигателя. Ключевое преимущество данного параметра заключается в его чувствительности к различным видам неисправностей: изменения нагрузочного режима, появление дисбаланса, износ подшипниковых узлов и повреждения обмоточных систем. При этом методика измерения токовых характеристик не требует сложного оборудования и может быть легко внедрена в промышленных условиях, что определяет ее практическую ценность. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка комплексных диагностических алгоритмов на основе анализа множества электрических параметров.

Для теоретического обоснования методики выбрано моделирование электромеханических процессов [20]. Классический подход, предполагающий анализ асинхронного двигателя в стационарной системе координат ( $\alpha$ - $\beta$ ) с применением фазового преобразования, хорошо описан в специализированной литературе<sup>5</sup> [21, 22, 23]. Математическая модель

включает уравнения электрического баланса, описывающие динамику токов статора с учетом приложенного напряжения, омического сопротивления обмоток и влияния магнитного поля ротора; уравнения магнитных потоков, учитывающие токовые характеристики статора, электрические параметры ротора и угловую скорость вращения; а также механическое уравнение, связывающее электромагнитный момент, момент внешней нагрузки и инерционные характеристики системы.

Особое внимание в исследовании уделено адаптации базовой модели для анализа специфических режимов работы крановых электроприводов. В рамках работы выполнена параметризация коэффициентов уравнений с учетом реальных эксплуатационных характеристик и модификация модели для учета характерных рабочих условий: переменная нагрузка, частые пусковые режимы и динамические переходные процессы. Такой подход позволяет получить более точные результаты моделирования, соответствующие реальным условиям эксплуатации кранового оборудования.

Необходимые для расчета параметры модели не являются паспортными и в полном объеме доступны только заводу-изготовителю. Приблизительные значения нужных параметров известны для электродвигателей общепромышленной серии, отличающихся от крановых меньшим сопротивлением обмоток ротора и меньшим пусковым моментом (т.е. использование параметров двигателей другой серии будет являться причиной ошибки моделирования). В связи с этим замечанием рассмотрим способ получения коэффициентов, учитывающих параметры кранового двигателя:

$$R_e = R_s + R_r K_r^2, \quad (2)$$

где  $R_s$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$R_r$  – активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

$K_r$  – коэффициент индуктивности ротора;

<sup>3</sup> Патент на полезную модель № 41460 U1 Российская Федерация, МПК В66С 23/90. Ограничитель грузоподъемности электрического крана: № 2004118956/22: заявл. 23.06.2004; опубл. 27.10.2004 / Д.Ю. Орлов, Ю.А. Орлов, Ю.Н. Румянцев, А.А. Обгольц; заявитель Томский государственный архитектурно-строительный университет. EDN GWMGDK.

<sup>4</sup> Патент на полезную модель № 61700 U1 Российская Федерация, МПК В66С 23/90. Ограничитель грузоподъемности электрического крана: № 2006136721/22: заявл. 16.10.2006; опубл. 10.03.2007 / Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет. EDN YZVVAY.

<sup>5</sup> Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.: ил. Библиогр.: с. 320. ISBN 5-06-003861-0.

$$R_r = \frac{A_1}{(\beta + \frac{1}{s_k})C_1}, \quad (3)$$

где  $A_1, C_1, \beta$  – промежуточные коэффициенты;  
 $s_k$  – критическое скольжение;

$$R_s = C_1 R_r \beta; \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{3U_f^2(1-s_H)}{2C_1 k_{Mmax} P}, \quad (5)$$

где  $U_f$  – фазное напряжение, В;  
 $s_H$  – номинальное скольжение;  
 $k_{Mmax}$  – коэффициент кратности максимального момента;  
 $P$  – номинальная мощность электродвигателя, Вт;

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2k_I I_H}, \quad (6)$$

где  $I_0$  – ток холостого хода электродвигателя, А;  
 $k_I$  – коэффициент кратности пускового тока;  
 $I_H$  – номинальный ток статора, А;

$$s_k = s_H \frac{k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - [1 - 2s_H \beta (k_{max} - 1)]}}{1 - 2s_H \beta (k_{max} - 1)}, \quad (7)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{0.5625 I_H^2 - \left[\frac{0.75 I_H (1-s_H)}{1-0.75 s_H}\right]^2}{1 - \left[\frac{0.75 I_H (1-s_H)}{1-0.75 s_H}\right]^2}}, \quad (8)$$

$$I_H = \frac{P}{3U \cos(\varphi) \eta}, \quad (9)$$

где  $\cos(\varphi)$  – коэффициент мощности электродвигателя;  
 $\eta$  – коэффициент полезного действия (КПД) электродвигателя;

$$K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad (10)$$

где  $L_m$  – индуктивность ветви намагничивания, Гн;  
 $L_r$  – полная индуктивность цепи ротора, Гн;

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f}, \quad (11)$$

где  $X_m$  – индуктивное сопротивление намагничивания, Ом;  
 $f$  – частота питающей сети, Гц;

$$X_m = \frac{E_m}{I_0}, \quad (12)$$

где  $E_m$  – электродвижущая сила ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного

зазора в обмотке статора в номинальном режиме, В;

$$E_m = \sqrt{(U \cos(f) - R_s I_H)^2 + (U \sqrt{1 - \cos(f)^2} - X_s I_H)}, \quad (13)$$

где  $X_s$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом;

$$X_s = 0.42 X_{кз}, \quad (14)$$

где  $X_{кз}$  – сопротивление короткого замыкания, Ом;

$$X_{кз} = \gamma C_1 R_r, \quad (15)$$

где  $\gamma$  – промежуточный параметр;

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2}, \quad (16)$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_m, \quad (17)$$

где  $L_{\sigma r}$  – индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенной к статорной;

$$L_{\sigma r} = \frac{X_r}{2\pi f}, \quad (18)$$

где  $X_r$  – индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной, Ом;

$$X_r = \frac{0.58 X_{кз}}{C_1}, \quad (19)$$

$$L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}, \quad (20)$$

где  $L_s$  – полная индуктивность цепи статора, Гн;

$$L_s = L_{\sigma s} + L_m, \quad (21)$$

где  $L_{\sigma s}$  – индуктивность рассеяния статорной обмотки;

$$L_{\sigma s} = \frac{X_s}{2\pi f}, \quad (22)$$

$$K_m = \frac{3}{2} K_r z_p, \quad (23)$$

где  $z_p$  – число пар полюсов электродвигателя;

$$A_r = \frac{R_r}{L_r}. \quad (24)$$

В результате была получена система дифференциальных уравнений в неподвижной системе координат  $\alpha$ - $\beta$ , записанная с помощью преобразования Кларка в нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\alpha}(t) - R_e \cdot i_{s\alpha}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) + K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t)] \\ \frac{di_{s\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\beta}(t) - R_e \cdot i_{s\beta}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) - K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t)] \\ \frac{d\psi_{r\alpha}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\alpha}(t) - A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t) \\ \frac{d\psi_{r\beta}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\beta}(t) - A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \{K_m \cdot [\psi_{r\alpha}(t) \cdot i_{s\beta}(t) - \psi_{r\beta}(t) \cdot i_{s\alpha}(t)] - M_c\} \end{cases}, \quad (25)$$

где  $i_{s\alpha}(t)$  – компонент пространственного вектора тока статора фазы  $\alpha$ ;

$i_{s\beta}(t)$  – компонент пространственного вектора тока статора фазы  $\beta$ ;

$U_{s\alpha}(t)$  – компонент пространственного вектора напряжения статора фазы  $\alpha$ ;

$U_{s\beta}(t)$  – компонент пространственного вектора напряжения статора фазы  $\beta$ ;

$\psi_{r\alpha}(t)$  – компонент пространственного вектора потокосцепления ротора фазы  $\alpha$ ;

$\psi_{r\beta}(t)$  – компонент пространственного вектора потокосцепления ротора фазы  $\beta$ ;

$R_e, L_e, R_r, K_r, K_m, A_r$  – коэффициенты, учитывающие параметры электродвигателя;

$z_p$  – количество пар полюсов;

$J$  – момент инерции вала электродвигателя;

$M_c$  – момент сопротивления.

Созданный математический аппарат на основе дифференциальных уравнений дает возможность анализировать поведение кранового электропривода в условиях динамических нагрузок, типичных для работы подъемных механизмов. Особенностью эксплуатации кранового оборудования являются частые кратковременные, но интенсивные механические воздействия, возникающие при преодолении рельсовых стыков, перекладке зазоров зубчатых передач или пусках механизма на номинальной скорости. Эти ударные нагрузки провоцируют скачкообразные изменения крутящего момента, вызывая существенные переходные процессы одновременно в меха-

нической и электрической составляющих привода, что необходимо выявлять и отделять от вновь возникших дефектов, а также отслеживать их увеличение. Анализ подобных режимов особенно важен для понимания реальных рабочих условий крановых механизмов, где периодические ударные воздействия являются нормой эксплуатации.

Для моделирования сопротивления на валу электродвигателя, несмотря на то что нагрузка прикладывается нелинейно, в первом приближении используется кусочно-заданная функция, зависящая от времени  $M_c(t)$ . С ее помощью на кратковременном отрезке моделируется возникающее сопротивление (скачок) (рисунок 1).

Преобразование трёхфазной системы в двухфазную ( $\alpha$ - $\beta$ -систему) существенно упрощает математическое описание асинхронного двигателя, уменьшая число переменных и исключая избыточные параметры. Такой подход облегчает анализ, сокращает объём вычислений и позволяет использовать современные алгоритмы управления. Кроме того, двухфазная модель обладает универсальностью, позволяя исследовать как симметричные, так и асимметричные режимы работы электродвигателя.

Для визуализации и экспериментальной проверки зависимостей, рассмотренных в предыдущем исследовании, в среде Wolfram Mathematica была разработана математическая модель асинхронного двигателя (АД).

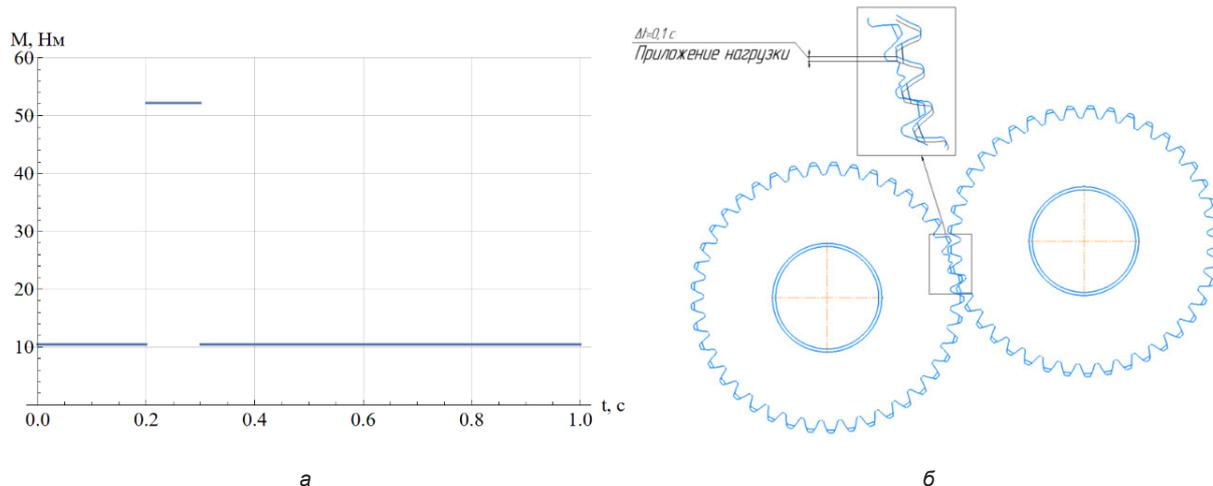


Рисунок 1 – Моделирование нагрузки: а – график кусочно-заданной функции; б – моделирование нагрузки – скол зуба в зубчатой передаче тихоходной ступени редуктора  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Load simulation: a – graph of a piecewise-defined function, b – load simulation – tooth chipping in the gear transmission of the low-speed stage of the reducer  
Source: compiled by the authors.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При теоретическом изучении динамических свойств асинхронного электродвигателя кранового механизма анализируется математическая модель, отображающая его электромеханические процессы. Численное моделирование и проверка адекватности модели выполняются на основе исходных параметров, характерных для промышленного двигателя мощностью 5 кВт (таблица).

Указанные номинальные и рабочие характеристики дают возможность определить параметры системы дифференциальных уравнений и исследовать динамику электропривода в различных эксплуатационных режимах, в том числе при пуске и изменяющейся механической нагрузке.

Для имитации внешнего нагружения используется кусочно-определённая функция, принимающая следующие значения:

$$\begin{cases} M_c = 0,2M_n, & t > 0 \\ M_c = M_n, & 0,2 \leq t \leq 0,3 \\ M_c = 0,2M_n, & t > 0,3. \end{cases} \quad (26)$$

Численное решение системы дифференциальных уравнений с заданными параметрами позволило выявить характер переходных процессов токов статора (рисунок 2). При исследовании установившегося режима дополнительно был проанализирован вариант с постоянной нагрузкой при  $t \geq 0,4$  с,  $M_c = M_n$  (рисунок 3), что дало возможность выполнить сравнительный анализ динамических характеристик электродвигателя.

Таблица  
Исходные параметры для теоретического расчета  
Источник: составлено авторами.

Table  
Initial parameters for theoretical calculation  
Source: compiled by the authors.

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Мощность	$P$	5000	Вт
Номинальное линейное напряжение	$U_l$	380	В
Фазное напряжение	$U_f$	220	В
Синхронная частота вращения	$\omega_0$	1000	об/мин
Номинальное скольжение	$s_n$	0.085	-
КПД	$\eta$	0.74	-
Коэффициент мощности	$\cos(\varphi)$	0.75	-
Кратность пускового тока	$k_I$	4.3	-
Кратность пускового момента	$k_M$	2	-
Кратность максимального момента	$k_{Mmax}$	2.3	-
Момент инерции ротора	$J_d$	0.056	кг·м <sup>2</sup>
Частота питающей сети	$f$	50	Гц
Число пар полюсов	$z_p$	3	-
Номинальный момент электродвигателя	$M_n$	52	Н·м

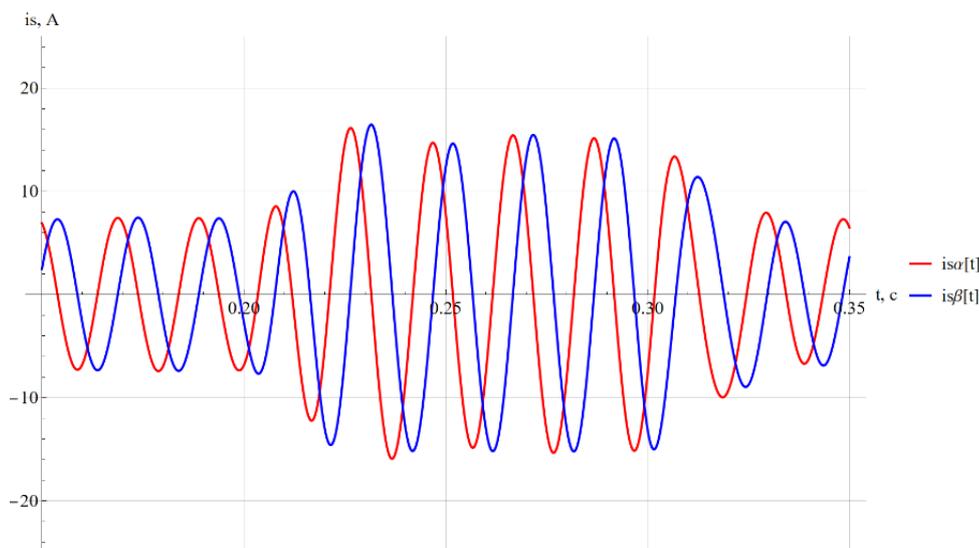


Рисунок 2 – Переходный процесс  $i_{sa}(t)$  и  $i_{sb}(t)$  при кратковременном набросе нагрузки (при  $0,2 \leq t \leq 0,3$ )  
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Transient process  $i_{sa}(t)$  and  $i_{sb}(t)$  during a short-term load surge (at  $0.2 \leq t \leq 0.3$ )  
Source: compiled by the authors.

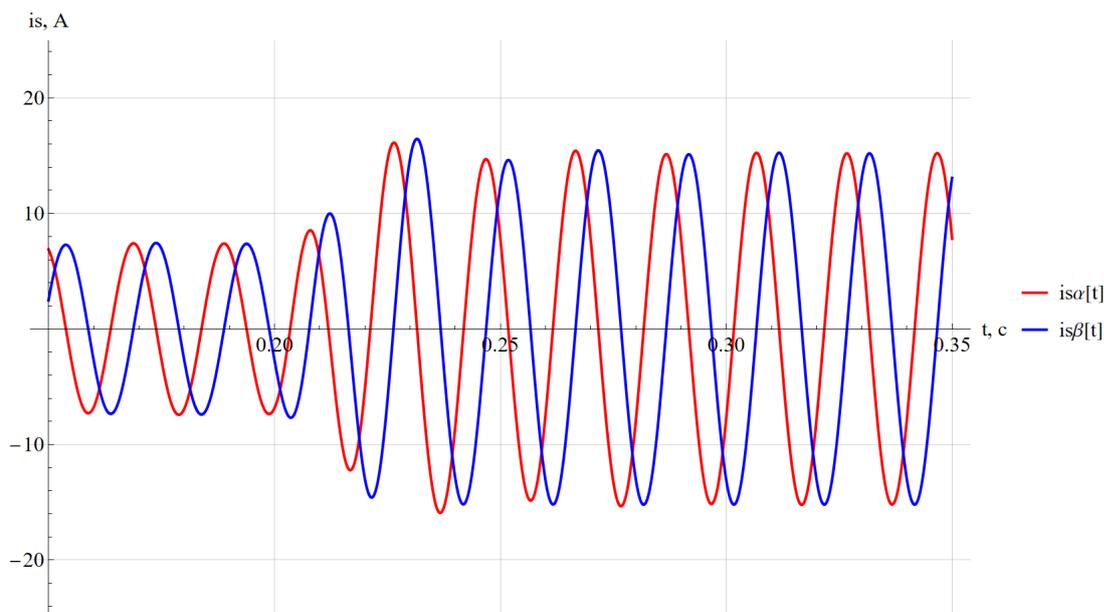


Рисунок 3 – Переходный процесс  $i_{sa}(t)$  и  $i_{sp}(t)$  при набросе нагрузки (при  $t \geq 0,3$ ). Установившийся режим работы  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Transient process  $i_{sa}(t)$  and  $i_{sp}(t)$  during load application (at  $t \geq 0,3$ ). Steady state operation.  
Source: compiled by the authors.

Сразу после уменьшения момента сопротивления ток статора демонстрирует увеличение периода колебаний, что проявляется в изменении длительности синусоидального цикла (рисунок 4).

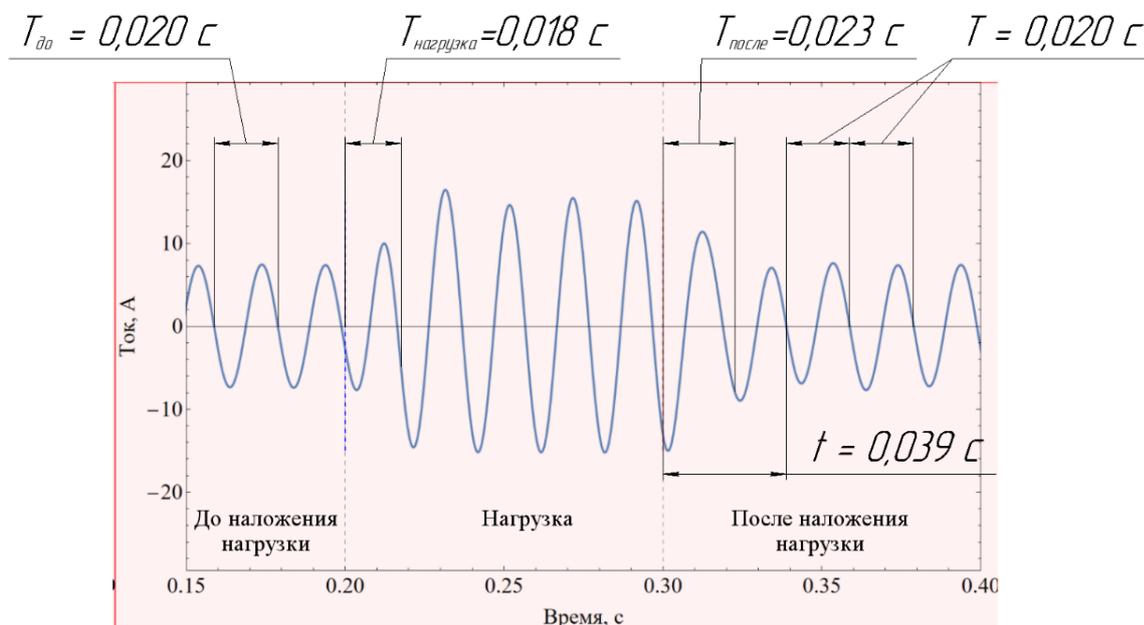


Рисунок 4 – Анализ переходного процесса тока статора  $i_{sp}(t)$  при кратковременном набросе нагрузки  
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Analysis of the transient process of stator current  $i_{sp}(t)$  during a short-term load surge  
Source: compiled by the authors.

Экспериментальные исследования демонстрируют существенное влияние импульсной механической нагрузки на колебания статорного тока: при наложении нагрузки период уменьшается с 0,020 до 0,018 с, а после ее снятия возрастает до 0,023 с. Время переходного процесса (при наложении и снятии нагрузки) превышает период колебаний тока в сети (0,039 против 0,020 с), что свидетельствует об ограниченности методики выявления дефектов только на основе измерений тока статора.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диагностика в режиме реального времени крановых механизмов является перспективным направлением развития подъемно-транспортной техники. В качестве одного из основных источников первичной информации может быть использован ток статора, реагирующий на изменение момента (причиной чего, в частности, являются возникающие дефекты) отклонением периода и амплитуды колебаний.

Ограниченность применения данного параметра обусловлена временем переходных процессов, обуславливающих задержку отклика тока статора на изменение момента, пропорциональную двум периодам колебаний питающей сети (для использованного в моделировании кранового двигателя). Таким образом, частота от дефекта, имеющего импульсный характер, приведенного к частоте вращения вала двигателя, принципиально не может быть больше 25 Гц.

Стоит отметить, что вычленение из полной нагрузки на электродвигатель составляющей, причиной которой являются дефекты, и повышение разрешения метода возможно только при использовании дополнительных источников информации о работе крановых механизмов (активная и реактивная мощность, скольжение, усилие на канатах и др.) и их совместной обработке.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Назаров А.Н. Исследования и разработки кафедры РК4 «Подъемно-транспортные системы» для создания современных приборов безопасности грузоподъемной техники // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2024. № 4. С. 34–40. EDN JIIQKE.
2. Иванов С.Д. Развитие направления «промышленная безопасность подъемных сооружений» на кафедре РК4 «Подъемно-транспортные системы» // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2024. № 4. С. 11–24. EDN GACZBH.
3. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Разработка перспективного прибора безопасности кранов мостового типа // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 6(100). С. 826–843. DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843. EDN TYGGUV.
4. Иванов С.Д., Назаров А.Н. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т. 19, № 1(83). С. 36–47. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47. EDN XZSFJQ.
5. Система защиты мостового крана на основе мониторинга параметров электропривода механизма подъема / Ю.А. Орлов, Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов [и др.] // *Известия Томского политехнического университета*. 2008. Т. 312, № 4. С. 119–124. EDN JRGNRR.
6. Орлов Ю.А., Столяров Д.П., Бурков В.П. Совершенствование системы защиты и контроля технического состояния электромеханической системы крана мостового типа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 2. С. 363–368. EDN ONBUND.
7. Иванова Н.Ю., Надеженков С.А., Назаров А.Н., Иванов С.Д. Объективная информация о работе подъемно-транспортных машин как основа повышения качества информационных систем грузообработывающих предприятий // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2023. № 2. С. 81–96. EDN MRGIFW.
8. Томаков В.И., Томаков М.В. Состояние промышленной безопасности при эксплуатации грузоподъемных кранов на объектах, подконтрольных Ростехнадзору // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 1(22). С. 27–41. EDN YLIIPX.
9. Никитин К.Д., Крыгина Т.А., Кузнецов А.А. Аварии грузоподъемных кранов как следствие опасных дефектов // *Подъемно-транспортное дело*. 2007. № 6(44). С. 17–21. EDN NJAPLL.
10. Pecinka P., Kocman S., Orsag P., Otypka J. Solutions to Increase the Efficiency of Induction Motors // *International Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967395>
11. Ban Y., Liu C., Yang F., Guo N., Ma X., Sui X., Huang Y. Failure Identification Method of Sound Signal of Belt Conveyor Rollers under Strong Noise Environment. *Electronics* 2024, 13, 34.
12. Liu C., Ban Y., Li H., Guo N., Ma X., Yang F., Sui X., Huang Y. Accurate Recognition Method for Rolling Bearing Failure of Mine Hoist in Strong Noise Environment. *Machines* 2023, 11, 632.
13. Yang S., Xiang D., Bryant A., Mawby P., Ran L., Tavner P. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377>.
14. Nahdi T., Maga D. Comparative Study of Frequency Converters for Doubly Fed Induction Machines. *Sustainability*. 2018, 10, 594. <https://doi.org/10.3390/su10030594>

15. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Исследование влияния работы ограничителя грузоподъемности с промежуточными порогами на безопасность кранов мостового типа // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2023. № 1. С. 41–52. EDN SZRVVB.

16. Иванов С.Д., Назаров А.Н. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т. 19, № 1(83). С. 36–47. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47. EDN XZSFJQ.

17. Михалев А.В., Назаров А.Н. Применение алгоритма скользящего среднего для задачи определения массы груза // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2023. № 2. С. 44–57. EDN XLXJRI.

18. Орлов Ю.А., Столяров Д.П., Орлов Д.Ю., Кахиев Р.Н. Способ контроля состояния тормоза лебедки с электроприводом // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 2. С. 357–362. EDN ONBUMT.

19. Назаров А.Н. Движущее усилие двигателя механизма подъема кранов мостового типа в реальных условиях эксплуатации // *Вестник СибАДИ*. 2023. Т. 20, № 1(89). С. 34–50. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>. EDN DJBHGB.

20. Копылов И.П., Амбарцумова Т.Т. Развитие методов и средств макро моделирования электрических машин // *Электротехника*. 2007. № 8. С. 19–24. EDN KYMUXZ.

21. Santana N.H.B., Oliveira F.D.C., Amorim A.E.A. et al. Enhancing Power Efficiency of Induction Motor with Field-Oriented Control Strategy under Sensor Noise Impact and Overmodulation Prevention. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2025; 36: 498–514.

22. Ebadpour M., Jamshidi M., Talla, J., Hashemi-Dezaki H., Peroutka Z. Digital Twin Model of Electric Drives Empowered by EKF. *Sensors*. 2023; 23(6): 2006. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042006>

23. Копылов И.П. Обобщенная электрическая машина и обобщенный электромеханический преобразователь // *Электротехника*. 2008. № 2. С. 50–54. EDN LAFKQR.

## REFERENCES

1. Nazarov A.N. Research and development of the RC4 Department «Lifting and transport systems» for the creation of modern safety devices for hoisting machines. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2024; (4): 34–40. (In Russ.) EDN JIIQKE.

2. Ivanov S.D. Development of the direction «Industrial safety of lifting structures» at the Department of RC4 «Lifting and transport systems». *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2024; (4): 11–24. (In Russ.) EDN GACZBH.

3. Nazarov A.N., Ivanov S.D. Developing an advanced safety device for bridge-type cranes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(6): 826–843. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843>. EDN: TYGGUV

4. Ivanov S.D., Nazarov A.N. Drive electrical parameters applicability evaluation to determine loads on bridge crane lifting mechanism. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(1): 36–47. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>

5. Orlov Yu.A., Dementiev Yu.N., Odnokopylov G.I. Bridge crane protection system based on monitoring the parameters of the electric drive of the lifting mechanism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2008; Vol. 312, No. 4: 119–124. (In Russ.) EDN JRGNRR.

6. Orlov Yu.A., Stolyarov D.P., Burkov V.P. Improvement of the protection and control system for the technical condition of the electromechanical system of a bridge crane. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; No. S2: 363–368. (In Russ.) EDN ONBUND.

7. Ivanova N.Yu., Ivanov S.D., Nadezhenkov S.A., Nazarov A.N. Objective information about the operation of lifting and transport machines as a basis for improving the quality of information systems of cargo handling enterprises. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023; (2): 81–96. (In Russ.)

8. Tomakov V.I., Tomakov M.V. The state of industrial safety at operation of load-lifting cranes at facilities controlled by rostekhnadzor. *Izvestiâ Úgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriâ Tehnika i tehnologii*. 2017; Vol. 7, No. 1(22); 27–41. (In Russ.) EDN YLIIPX.

9. Nikitin K.D., Krygina T.A., Kuznetsov A.A. Accidents involving lifting cranes as a result of dangerous defects. *Lifting and Transport Business*. 2007; 6(44): 17–21. (In Russ.) EDN NJAPLL.

10. Pecinka P., Kocman S., Orsag P., Otypka J. Solutions to Increase the Efficiency of Induction Motors. *International Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2017; Vol. 8: 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967395>

11. Ban Y., Liu C., Yang F., Guo N., Ma X., Sui X., Huang Y. Failure Identification Method of Sound Signal of Belt Conveyor Rollers under Strong Noise Environment. *Electronics*. 2024; 13: 34.

12. Liu C., Ban Y., Li H., Guo N., Ma X., Yang F., Sui X., Huang Y. Accurate Recognition Method for Rolling Bearing Failure of Mine Hoist in Strong Noise Environment. *Machines*. 2023; 11: 632.

13. Yang S., Xiang D., Bryant A., Mawby P., Ran L., Tavner P. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010; vol. 25, no. 11: 2734–2752. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377>.

14. Nahdi, T., Maga, D. Comparative Study of Frequency Converters for Doubly Fed Induction Machines. *Sustainability*. 2018; 10: 594. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10030594>

15. Nazarov A.N., Ivanov S.D. Influence of capacity limiter operation with tripping thresholds on the overhead cranes safety. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023; 1(1): 41–52. (In Russ.)

16. Ivanov S.D., Nazarov A.N. Drive electrical parameters applicability evaluation to determine loads on bridge crane lifting mechanism. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(1): 36–47. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>

17. Mikhalev A.V., Nazarov A.N. Applying the moving average algorithm for the weight calculation task. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023; (2): 44–57. (In Russ.)

18. Orlov Yu.A., Stolyarov D.P., Orlov D.Yu., Kakhiev R.N. Method for monitoring the condition of an electric winch brake. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; S2: 357-362. (In Russ.) EDN ONBUMT.

19. Nazarov A.N. Motor driving force of bridge-type crane lifting mechanism under real operating use. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(1): 34–50. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>

20. Kopylov I.P., Ambartsumova T.T. Development of methods and means of macromodeling of electric machines. *Electrical engineering*. 2007; 8: 19–24. (in Russ.) EDN KYMUXZ.

21. Santana N.H.B., Oliveira F.D.C., Amorim A.E.A. et al. Enhancing Power Efficiency of Induction Motor with Field-Oriented Control Strategy under Sensor Noise Impact and Overmodulation Prevention. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2025; 36: 498–514.

22. Ebadpour M., Jamshidi M., Talla, J., Hashemi-Dezaki H., Peroutka Z. Digital Twin Model of Electric Drives Empowered by EKF. *Sensors*. 2023; 236: 2006. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042006>

23. Kopylov I.P. Generalized electric machine and generalized electromechanical converter. *Electrical Engineering*. 2008; 2: 50–54. (in Russ.) EDN LAFKQR.

### ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Иванов С.Д. Вклад в общую работу заключается в постановке цели и задач исследования, анализа результатов математического моделирования, подготовке текста статьи.

Йылмаз М.Ю. Вклад в общую работу заключается в разработке математической модели, ана-

лиза результатов математического моделирования, подготовке текста статьи.

### CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

S.D. Ivanov Contribution to the entire work made through setting the research goals and objectives, analyzing the results of mathematical modeling, and preparing the text of the manuscript.

M.Yu. Yilmaz Developing a mathematical model, analyzing the results of mathematical modeling, and writing the manuscript.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>,

**SPIN-код:** 8035-2780,

**e-mail:** [ptm-diagnostics@yandex.ru](mailto:ptm-diagnostics@yandex.ru)

Йылмаз Михаил Юминович – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7246-4116>,

**SPIN-код:** 9311-4187,

**e-mail:** [mihailsolovev287@gmail.com](mailto:mihailsolovev287@gmail.com)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey D. Ivanov – Associate Professor, Department of Hoisting and Transport Systems, Bauman Moscow State Technical University (2nd Baumanskaya St., 5, bldg. 1, Moscow, 105005).

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>,

**SPIN code:** 8035-2780,

**e-mail:** [ptm-diagnostics@yandex.ru](mailto:ptm-diagnostics@yandex.ru)

Mikhail Y. Yilmaz – Postgraduate Student, Department of Hoisting and Transport Systems, Bauman Moscow State Technical University (2nd Baumanskaya St., 5, bldg. 1, Moscow, 105005).

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7246-4116>,

**SPIN code:** 9311-4187,

**e-mail:** [mihailsolovev287@gmail.com](mailto:mihailsolovev287@gmail.com)