

Научная статья

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>

EDN: DJBHGB



ДВИЖУЩЕЕ УСИЛИЕ ДВИГАТЕЛЯ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. Н. Назаров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

alexnazavr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

АННОТАЦИЯ

Введение. Выявлена потребность в моделировании динамических процессов механизма подъема в реальных условиях эксплуатации. Определена необходимость повышения точности описания движущего усилия двигателя для наиболее распространенных типов управления приводом кранового механизма подъема.

Материалы и методы. Рассмотрена работа односкоростного электродвигателя с короткозамкнутым ротором без управления скоростью, с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной обмотке и с короткозамкнутым ротором и управлением от преобразователя частоты. В качестве исходной зависимости принята статическая механическая характеристика электродвигателя. Для учета движущего усилия двигателя при частотной системе управления и при релейно-контакторной и электродвигателем с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной цепи использовалась формула Клосса с соответствующими значениями параметров: синхронной скорости, критического усилия и критического скольжения.

Результаты. Представлены зависимости для движущего усилия двигателя, описывающие работу механизма с наиболее распространенными способами управления скоростью привода кранового механизма подъема. В случае частотной системы управления приведена форма записи движущего усилия двигателя в случае установившегося движения и в случае переходных процессов пуска / торможения, при реализации соответствующих алгоритмов преобразователем частоты. Приведены экспериментальные и теоретические графики процессов подъема груза для случаев подъема с подхватом при релейно-контакторной системе управления и с упругим подхватом при частотной системе управления.

Выводы. Сделан вывод о применимости статической механической характеристики для описания работы электродвигателя в крановых приводах. Представленные зависимости обеспечивают возможность моделировать полный рабочий цикл механизма подъема. Зависимости справедливы как во время установившегося движения механизма, так и во время переходных процессов. Сделан вывод об использовании динамической модели, учитывающей представленную форму движущего усилия двигателя, в практических целях для анализа работы крана с учетом влияния ограничителя грузоподъемности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механизм подъема, нагрузка на механизм, динамическая модель крана, кран мостового типа, движущее усилие двигателя, способы управления приводом, частотная система управления, релейно-контакторная система управления

БЛАГОДАРНОСТЬ: автор статьи выражает свою благодарность сотрудникам кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана за их помощь, советы, рекомендации, ценные замечания и критику.

Статья поступила в редакцию 04.12.2022; одобрена после рецензирования 15.12.2022; принята к публикации 20.02.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>

© Назаров А. Н., 2023

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>
EDN: DJBHGB

MOTOR DRIVING FORCE OF BRIDGE-TYPE CRANE LIFTING MECHANISM UNDER REAL OPERATING USE

Aleksandr N. Nazarov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
alexnazavr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

ABSTRACT

Introduction. The requirement for modelling the dynamic processes of a hoisting mechanism in real operating situations has been revealed. The necessity of increasing the accuracy of moving effort description for the most common types of crane hoist drive control has been determined.

Materials and Methods. The operation of a single-speed electric motor with squirrel-cage rotor without speed control, with a phase rotor and additional resistors in the rotor winding and with a squirrel-cage rotor and control by a frequency converter has been considered. The static characteristic of the electric motor is taken as the initial function. The Clauss formula with the corresponding values of the parameters synchronous speed, critical force and critical slip was used to take into account the driving force of the motor for frequency control and for relay-contactor control and a motor with a phase-rotor and additional resistances in the rotor circuit.

Results. The dependences for the motor driving force with the most common methods of speed control of the crane hoisting mechanism drive are presented. In the case of the frequency control system, the form of the motor driving force is given in the case of steady-state motion and in the case of transient starting/braking processes when the corresponding algorithms are implemented by a frequency converter. Experimental and theoretical graphs of the load lifting processes for the cases of lifting with pickup in the relay-contactor control system and with elastic pickup in the frequency control system are given.

Conclusion. The conclusion about applicability of static mechanical characteristic for description of electric motor operation in crane drives is given. The presented dependences provide an opportunity to model the full working cycle of the hoisting mechanism. The dependences are valid both during steady motion of the mechanism and during transients. It is concluded about the use of the dynamic model taking into account the presented form of the motor driving force for practical purposes for the analysis of the crane operation with regard to the effect of the lifting capacity limiter.

KEYWORDS: hoisting mechanism, mechanism loading, dynamic model of crane, bridge-type crane, motor driving force, drive control methods, frequency control system, relay-contactor control system

ACKNOWLEDGEMENT. The author of the article express gratitude to the staff of the Lifting and Transport Systems Department of the Bauman Moscow State University for their help, advice, recommendations, valuable comments and criticism.

The article was submitted 4.12.2022; approved after reviewing 15.12.2022; accepted for publication 20.02.2023.

The 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. Aleksandr N. Nazarov 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>

© Nazarov A. N., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Исследование выполняется в рамках решения задачи повышения безопасности эксплуатации грузоподъемных машин. Потенциал к повышению безопасности автор видит в оценке характера работы кранов в реальных условиях эксплуатации [1, 2, 3].

Процесс эксплуатации сопровождается возникновением в элементах крана нагрузок¹, имеющих непостоянный, динамический характер [4, 5]. Соответственно для описания характера работы требуется построить динамическую модель, на основе которой можно было бы вычислить реальные нагрузки во всех допустимых в процессе эксплуатации положениях крана и способах управления им. Данная работа посвящена решению задачи для механизма подъема.

На основе анализа технологического процесса работы крана был выявлен перечень возможных особенностей эксплуатации, оказывающих влияние на динамические нагрузки, что позволило сформировать перечень этапов динамического процесса, полно описывающих любой рабочий цикл механизма подъема крана в реальных условиях эксплуатации. При этом каждый отдельный цикл работы может включать как все этапы, так и их часть.

Специфика существующих динамических моделей заключается в рассмотрении только наиболее опасных расчетных случаев, определенных по критерию возможности достижения в них наибольших динамических нагрузок² [6, 7, 8].

Следствием такого подхода явилось упрощенное рассмотрение и объединение ряда этапов. Этапы, на которых динамические нагрузки не могут превысить максимальные значения нагрузок других этапов, не рассматривались вовсе и математического описания не имели.

Кроме того, параметры моделей, изменяющиеся в процессе эксплуатации крана или даже непосредственно в процессе подъема³, учтены упрощенно [9, 10, 11].

Таким образом, существующие динамические модели описывают лишь часть реализуемых на практике расчетных случаев, а допущения, принятые при их описании, не позволяют получить решения требуемой точности при описании произвольного рабочего цикла механизма подъема.

Ранее авторами были введены новые расчетные случаи, не описанные в существующих динамических моделях: пауза до отрыва груза от основания, повторный пуск двигателя до отрыва груза от основания, остановка двигателя после отрыва груза от основания, повторный пуск двигателя после отрыва груза от основания.

Способ учета движущего усилия двигателя⁴ в известных динамических моделях не позволил описать часть введенных расчетных случаев с требуемой точностью⁵, а часть вовсе [12, 13, 14].

В существующих моделях рассматриваются два случая начала подъема груза: подъем

¹ Петренко В. Исследование динамики мостового крана с использованием мультивариантных расчетов / В. Петренко, П. Жевжигов // Проблемы безопасности на транспорте: МАТЕРИАЛЫ XI МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ. В 2 частях, Гомель, 25–26 ноября 2021 года. Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2021. С. 53–54. EDN UNOIKK.

² Корытов М. С. Исследование влияния массы груза на силы со стороны приводов мостового крана при движении в режиме гашения неуправляемых колебаний / М. С. Корытов, В. С. Щербаков, В. В. Титенко // Проблемы машиноведения: Материалы IV Международной научно-технической конференции, Омск, 17–19 марта 2020 года / Научный редактор П. Д. Балакин. Омск: Омский государственный технический университет, 2020. С. 72–80. EDN MEMBWY.

³ Михальчик Н. Л. Определение динамических параметров крана для построения полуавтоматической системы настройки прибора-ограничителя грузоподъемности / Н. Л. Михальчик // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 04 апреля 2019 года. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. С. 543–546. EDN UJMDRV.

⁴ Кабаев Д. М. Исследование динамических процессов крана при работе механизма подъема / Д. М. Кабаев, В. Е. Тюленев // Семьдесят четвертая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции: в 2 ч., Ярославль, 21 апреля 2021 года. Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2021. С. 200–203. EDN LWIGFN.

⁵ Назаров А. Н. Экспериментальное и теоретическое определение частоты опроса датчика нагрузки для защиты механизма подъема крана от перегрузок / А. Н. Назаров, С. Д. Иванов // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2021): Труды конференции, Москва, 30 ноября – 02 декабря 2021 года. Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, 2021. С. 157–162. EDN EUPIWD.

с подхватом и подъем с веса. При этом форма записи движущего усилия двигателя в обоих случаях принята такой, чтобы приводить к наибольшим динамическим нагрузкам.

Условием подъема с подхватом является работа двигателя на установившейся ветви статической механической характеристики, соответствующей наибольшей скорости электродвигателя. По этой причине движущее усилие двигателя учитывается линейной зависимостью от текущей скорости двигателя.

При подъеме с веса в большинстве динамических моделей [7, 10, 11, 12, 14] движущее усилие двигателя на неустановившейся части механической характеристики принимается равным среднепусковому усилию, что, с одной стороны, позволяет сохранить возможность получения аналитического решения во время переходного процесса, но, с другой стороны, снижает точность описания динамических нагрузок и кинематических характеристик.

В динамической модели Н. А. Лобова [15] и моделях, построенных на ее основе, движущее усилие двигателя описывается согласно статической механической характеристике по формуле

$$P = \frac{a_1 - a_2 \dot{x}_1}{a_3 + \alpha(-a_4 \dot{x}_1 + \dot{x}_1^2)}, \quad (1)$$

где

$P [H]$ – движущее усилие двигателя;

$$a_1 \left[\frac{H \cdot M^2}{c^2} \right] = 2P_K \cdot s_K \cdot \dot{x}_c^2;$$

$P_K [H]$ – движущее усилие, соответствующее критическому скольжению;

s_K – критическое скольжение;

$\dot{x}_c \left[\frac{M}{c} \right]$ – синхронная скорость;

$$a_2 [H] = a_1 / \dot{x}_c;$$

$\dot{x}_1 \left[\frac{M}{c} \right]$ – текущая скорость электродвигателя;

$$a_3 \left[\frac{M^2}{c^2} \right] = s_K^2 \dot{x}_c^2 + \dot{x}_c^2;$$

$$a_4 \left[\frac{M}{c} \right] = 2\dot{x}_c;$$

α – коэффициент, указывающий часть механической характеристики, на которой работает электродвигатель; $\alpha = 0$ для работы на линейной части установившейся ветви механической характеристики; $\alpha = 1$ для работы на любой ветви механической характеристики.

Для формы учета движущего усилия двигателя по формуле (1) не обоснована приме-

нимость в крановом приводе с точки зрения влияния переходных электрических процессов, возникающих при подключении электродвигателя к сети.

Направленность существующих моделей на вычисление максимальных нагрузок также обусловила отсутствие возможности получения решений для случаев, когда привод оснащен системами управления скоростью.

По той же причине в динамических моделях не описана форма представления движущего усилия двигателя при торможении, что характерно для приводов с частотной системой управления.

Целью исследования является разработка формы учета движущего усилия двигателя кранового механизма подъема, оснащенного наиболее распространенными системами управления.

Задача исследования: разработать зависимости, описывающие работу электродвигателя механизма подъема, соответствующего:

- релейно-контакторной системе управления и односкоростным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором;
- релейно-контакторной системе управления и п-скоростным асинхронным электродвигателем с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной цепи;
- частотной системе управления и односкоростным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходной зависимости для описания движущего усилия двигателя принята формула Клосса [15] для случая работы электродвигателя на любой ветви механической характеристики (рисунок 1), в следующем виде

$$P_{\alpha=1} = 2 \cdot P_K \cdot s_K \cdot \dot{x}_c \cdot \frac{\dot{x}_c - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c - \dot{x}_1)^2 + s_K^2 \cdot \dot{x}_c}, \quad (2)$$

где

$P_{\alpha=1} [H]$ – движущее усилие двигателя, описывающее работу привода с релейно-контакторной схемой управления и односкоростным электродвигателем с короткозамкнутым ротором.

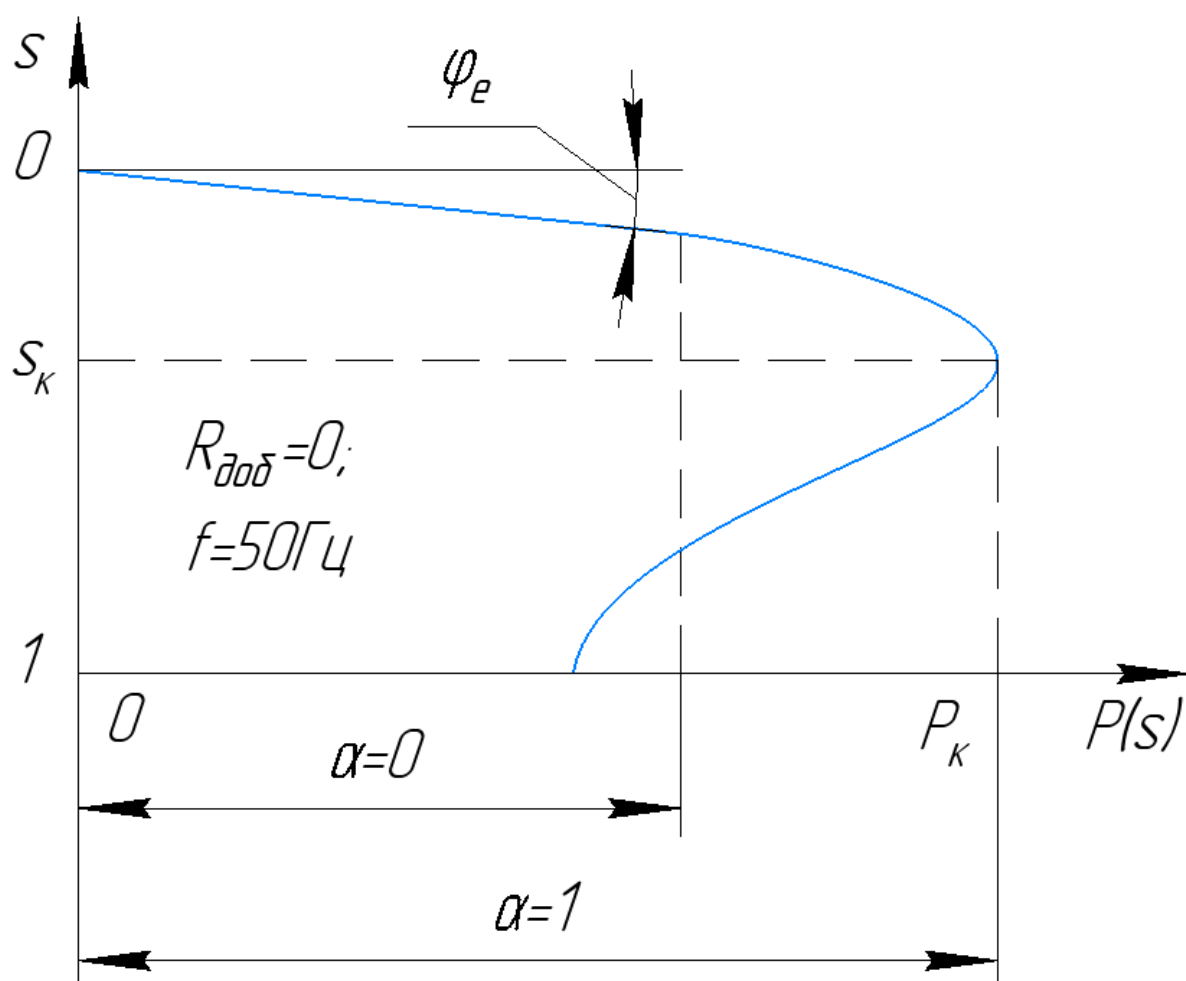


Рисунок 1 – Движущее усилие двигателя, описывающее работу привода с релейно-контакторной схемой управления и односкоростным электродвигателем с короткозамкнутым ротором:
 s – скольжение; s_k – критическое скольжение;
 φ_e – угол наклона линейной ветви естественной механической характеристики;
 $P(s)$ – движущее усилие двигателя; $R_{доб}$ – величина добавочного сопротивления;
 $\alpha=0$ – область работы на линейной части установившейся ветви механической характеристики;
 $\alpha=1$ – область работы на любой ветви механической характеристики
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Motor driving force describing the operation of a drive with a relay-contact control system and a single-speed electric motor with squirrel-cage rotor.
 s – slip; s_k – critical slip; φ_e – angle of the linear part of the main mechanical characteristic,
 $P(s)$ – motor drive force; $R_{доб}$ – additional resistor value;
 $\alpha=0$ – operation area on the linear part of the steady-state mechanical characteristic;
 $\alpha=1$ operation area on any part of the mechanical characteristic.
 Source: compiled by the author.

Преимуществом такого способа учета данного параметра динамической модели является удобство практического применения. Это обусловлено тем, что составляющие формулы

– синхронная скорость, критическое усилие и критическое скольжение – возможно определить, зная лишь паспортные характеристики электродвигателя.

Однако реализация такого способа учета движущего усилия двигателя требует принять допущение, что переходные электрические процессы не оказывают значимого влияния на описываемую величину. Формула Клосса является способом представления статической механической характеристики, следовательно, переходные электрические процессы в ней не учитываются.

Важно оценить влияние переходных электрических процессов при пуске электродвигателя для рассматриваемых систем управления.

При включении электродвигателя в сеть в статорных обмотках возникает ток, имеющий две составляющие: принужденную синусоидальную [16] с частотой сети и свободную апериодическую [17, 18]. Аналогичные две составляющие возникают в обмотках ротора.

Взаимодействие токов и магнитных потоков статора и ротора приводит к образованию электромагнитных моментов. Один момент, вызванный принужденными составляющими токов и магнитных потоков, соответствует статической механической характеристике асинхронного двигателя в установившемся режиме. Другой момент носит колебательный знакопеременный характер и суммируется с электромагнитным моментом от принужденной составляющей токов.

По мере разгона двигателя свободные составляющие токов и вызванные ими переменные составляющие момента затухают и по достижении при разгоне двигателя критического скольжения практически исчезают.

Таким образом, переходные электрические процессы при прямом пуске электродвигателя оказывают значительное влияние на результирующий электромагнитный момент, делая недопустимым описание процесса на основании статической механической характеристики, то есть формулы (2).

Однако механизмы грузоподъемных машин оснащаются специально разработанными под их условия работы крановыми электродвигателями [19, 20]. Они отличаются повышенным критическим и пусковым моментами и относительно электродвигателей общепромышленной серии большим сопротивлением ротора. Повышенное сопротивление ротора способствует уменьшению амплитуды колебаний электромагнитного момента при пуске и более быстрому затуханию колебательной составляющей.

При пуске механизма, оснащенного двигателем с фазным ротором, в обмотки ротора

включены дополнительные сопротивления, благодаря которым колебательная составляющая электромагнитного момента затухает еще быстрее, чем в случае кранового электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

При частотной системе управления разгон электродвигателя принудительно растягивается во времени за счет плавного повышения частоты питающего напряжения [18]. Кроме того, при пусковой частоте уменьшается и величина синхронной скорости, из-за чего в момент включения электродвигателя область критического скольжения уже оказывается пройденной. Благодаря этому, переходные электрические процессы не оказывают значимого влияния на движущее усилие двигателя.

Таким образом, учет движущего усилия двигателя с помощью статической механической характеристики по формуле (1) применим в случае описания движения крановых приводов, имеющих наиболее распространенные исполнения.

Для описания движущего усилия двигателя при иных способах управления приводом внесем изменения в параметры формулы (2). Такими параметрами являются: критический момент, критическое скольжение и синхронная скорость.

Введение в цепь ротора асинхронного двигателя добавочного сопротивления приводит к снижению критического скольжения в соответствии со следующей зависимостью [19]:

$$s_k^i = \frac{R_2 + R_{доб}^i}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}, \quad i = 1, \dots, k, \quad (3)$$

где

s_k^i – критическое скольжение на i -й скорости;

R_2 [Ом] – активное сопротивление цепи ротора;

$R_{доб}^i$ [Ом] – добавочное активное сопротивление цепи ротора;

R_1 [Ом] – активное сопротивление обмотки статора;

X_k [Ом] – реактивное сопротивление короткого замыкания;

k – число ступеней дополнительных сопротивлений (искусственных характеристик).

При таком построении системы управления приводом сохраняются синхронная скорость и критический момент. Общий вид характеристик при ступенчатом регулировании представлен на рисунке 2.

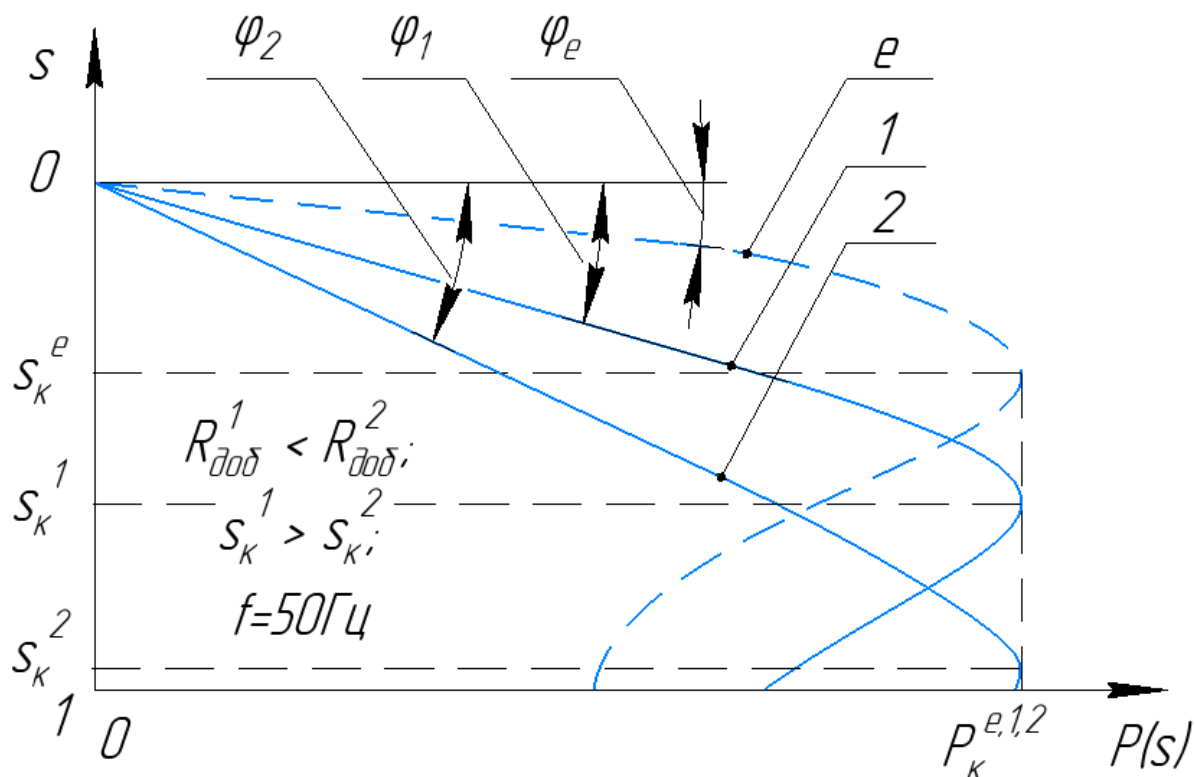


Рисунок 2 – Движущее усилие двигателя при регулировании скорости электродвигателя с фазным ротором включением в роторную цепь дополнительных сопротивлений: s_K^i – критическое скольжение на i -й скорости: $i=e$ – на естественной характеристике, $i=1$ – на первой искусственной характеристике и т.д.
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Motor driving force for speed control of a phase-rotor motor by including additional resistors in the rotor circuit.

s_K^i – critical slip on-speed: $i=e$ – on the main characteristic, $i=1$ – the first position of the command controller corresponding to the minimum speed (the biggest additional resistance), etc.
Source: compiled by the author.

При частотном регулировании (в сторону уменьшения частоты питающей сети) в режиме коррективы напряжения $\frac{f}{U} = \text{const}$ критический момент свое значение на всех искусственных характеристиках. Одновременно пропорционально уменьшению частоты снижается синхронная скорость (рисунок 3) согласно формуле

$$\dot{x}_c^f = \frac{f}{f_{\text{НОМ}}} \dot{x}_c^{\text{НОМ}}. \quad (4)$$

Критическое скольжение снижается согласно формуле

$$s_K^f = s_K^{\text{НОМ}} + \left(1 - \frac{f}{f_{\text{НОМ}}}\right), \quad (5)$$

где

$\dot{x}_c^f \left[\frac{\text{М}}{\text{с}}\right]$ – синхронная скорость при частотном регулировании;
 $f \text{ [Гц]}$ – текущая частота питающего напряжения ($f \in [0; f_{\text{НОМ}}]$);
 $f_{\text{НОМ}} \text{ [Гц]}$ – номинальная частота питающего напряжения, равная 50 Гц;
 $\dot{x}_c^{\text{НОМ}} \left[\frac{\text{М}}{\text{с}}\right]$ – синхронная скорость в номинальном режиме работы электродвигателя;
 s_K^f – критическое скольжение при частотном регулировании;
 $s_K^{\text{НОМ}}$ – критическое скольжение в номинальном режиме работы электродвигателя.

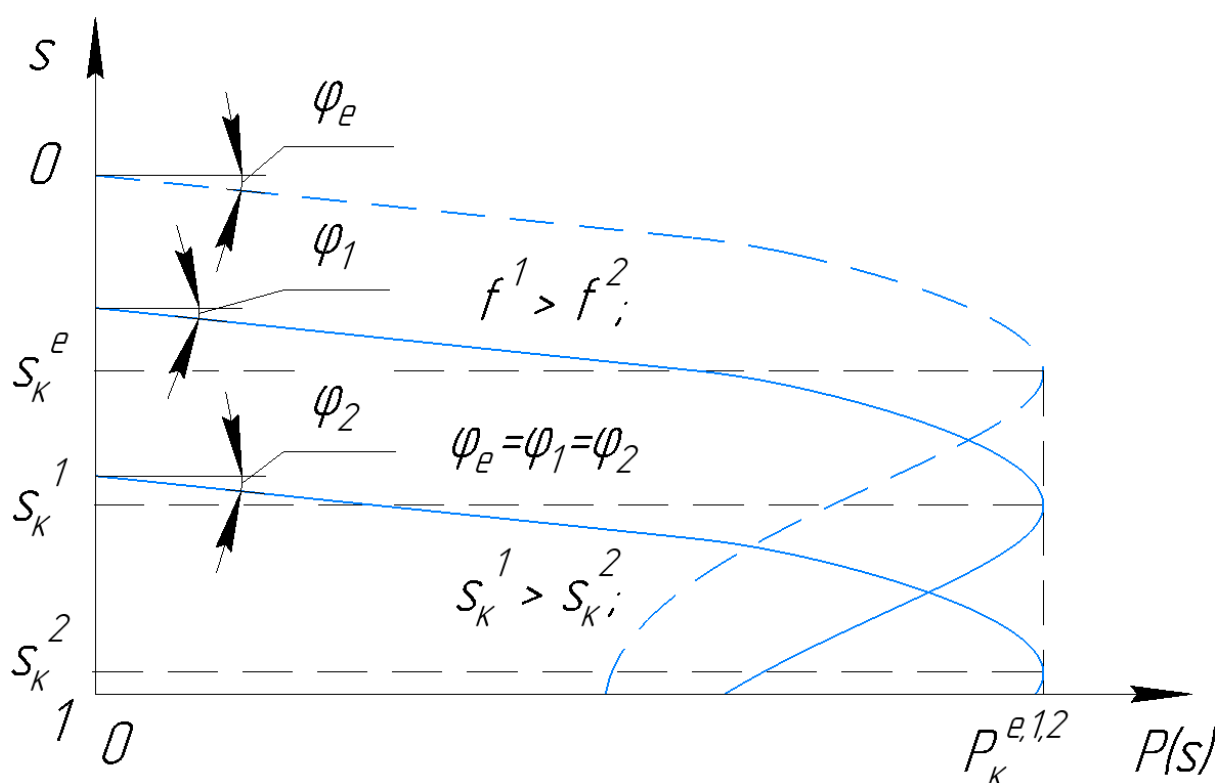


Рисунок 3 – Движущее усилие двигателя с короткозамкнутым ротором и питанием от преобразователя частоты
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Motor driving force for a squirrel cage motor powered by a frequency converter
Source: compiled by the author.

Следует отметить, что в большинстве крановых электроприводов, оснащенных преобразователями частоты, применяется настройка, которая задает алгоритм прохождения переходных процессов пуска и торможения электродвигателя [20]. Пуск и торможение ме-

ханизмов подъема осуществляется по рампе, настраиваемыми параметрами которой являются: начальная и конечная частота питающего напряжения при пуске, конечная частота при торможении и время разгона или торможения (рисунок 4):

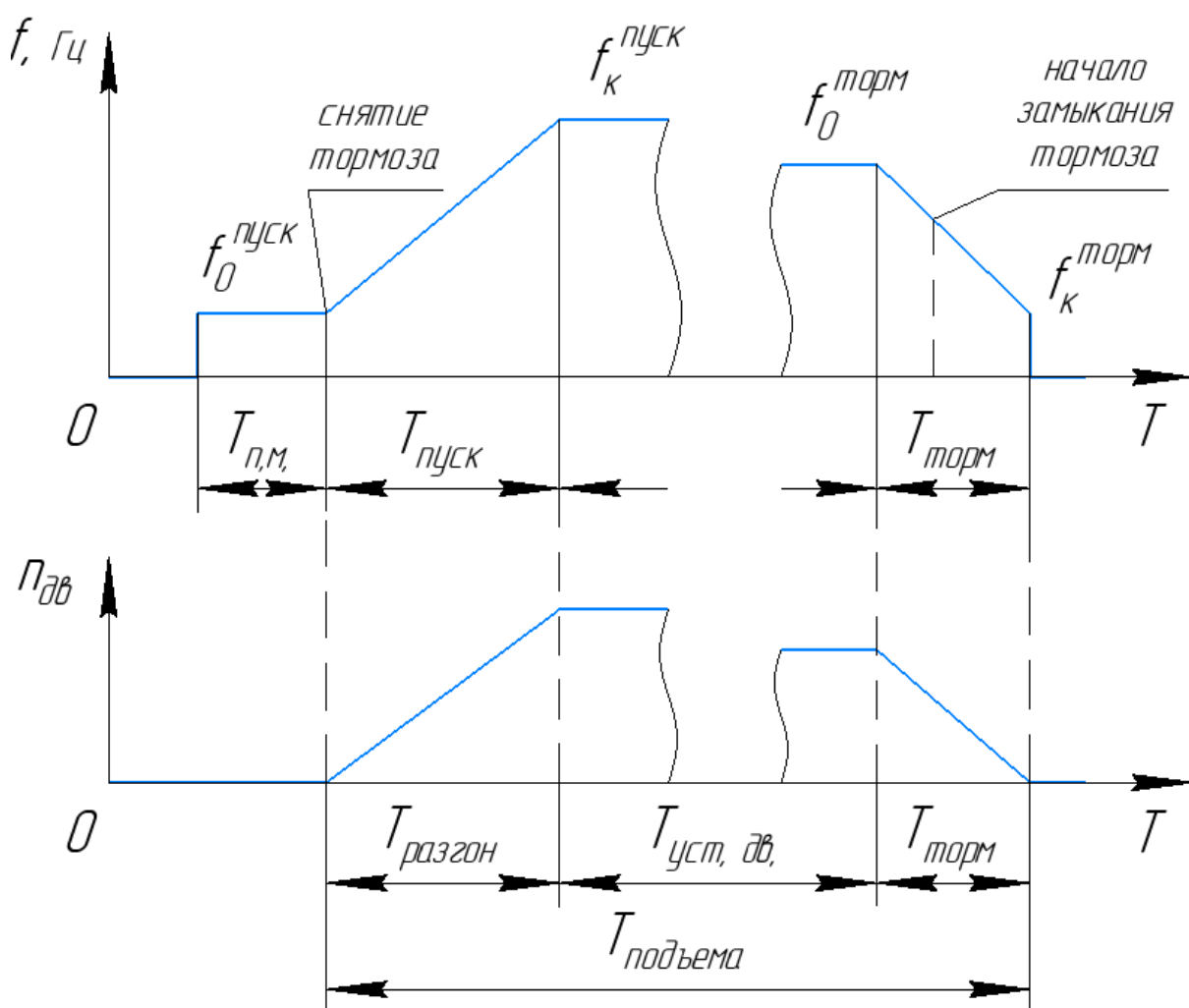


Рисунок 4 – График частоты питающего напряжения во время переходных процессов в случае частотной системы управления:

$f_0^{\text{пуск}}$ – начальная частота при пуске; $f_0^{\text{торм}}$ – начальная частота при торможении;
 $f_к^{\text{пуск}}$ – конечная частота при пуске; $f_к^{\text{торм}}$ – конечная частота при торможении;
 $T_{\text{п.м.}}$ – время пуска механизма; $T_{\text{пуск}}$ – время переходного процесса при пуске;
 $T_{\text{торм}}$ – время переходного процесса при торможении; $T_{\text{разгон}}$ – время разгона механизма;
 $T_{\text{уст.дв.}}$ – время установившегося движения; $T_{\text{подъема}}$ – общее время подъема (от включения механизма до его остановки)

Источник: составлено автором.

Figure4 – Supply voltage frequency during transients in the case of a frequency control system.

$f_0^{\text{пуск}}$ – starting frequency; $f_0^{\text{торм}}$ – initial deceleration frequency;
 $f_к^{\text{пуск}}$ – final starting frequency; $f_к^{\text{торм}}$ – final deceleration frequency;
 $T_{\text{п.м.}}$ – drive start-up time; $T_{\text{пуск}}$ – transient start-up time;
 $T_{\text{торм}}$ – transient deceleration time; $T_{\text{разгон}}$ – acceleration time;
 $T_{\text{уст.дв.}}$ – steady-state time; $T_{\text{подъема}}$ – total hoisting time (from turning the drive on until it stops).

Source: compiled by the author.

Таблица
Основные параметры экспериментальной установки
Источник: составлено автором.

Table
Basic parameters of the experimental system
Source: compiled by the author.

Грузоподъемность крана	Масса груза	Двигатель механизма подъема	Мощность двигателя подъема	Синхронная частота вращения	Номинальная частота вращения
2 т	2 т	МТКН-112-6	5 кВт	1000 об/мин	910 об/мин
Номинальный крутящий момент, Нм	$M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$	Момент инерции ротора	Диаметр барабана	Передаточное число редуктора	Кратность полиспаста
52,5	2,3	0,056 кг м ²	0,198 м	38,1	2

Во время пуска и торможения линейный закон изменения частота описывается формулой (6):

$$f = f_0^{\text{пуск}} + \frac{f_0^{\text{пуск}} - f_0^{\text{торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t, t \in [0; t_{\text{пуск/торм}}], \quad (6)$$

где

$f_0^{\text{пуск/торм}}$ [Гц] – начальная частота при пуске / торможении;

$f_k^{\text{пуск/торм}}$ [Гц] – конечная частота при пуске / торможении;

$t_{\text{пуск/торм}}$ [с] – время пуска / торможения.

При этом в течение пуска / торможения непрерывно изменяются синхронная скорость и критическое скольжение, которые описываются формулами (7) и (8) соответственно:

$$\dot{x}_c^f = \frac{f_0^{\text{пуск/торм}} + \frac{f_k^{\text{пуск/торм}} - f_0^{\text{пуск/торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t}{f_{\text{ном}}} \dot{x}_c^{\text{ном}}. \quad (7)$$

$$s_k^f = s_k^{\text{ном}} + \left(1 - \frac{f_0^{\text{пуск/торм}} + \frac{f_k^{\text{пуск/торм}} - f_0^{\text{пуск/торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t}{f_{\text{ном}}} \right). \quad (8)$$

Для оценки полученных в данной работе зависимостей проведен эксперимент, заключающийся в подъеме груза известной массы краном, оснащенным релейно-контакторной

и частотной системой управления. В качестве экспериментальной установки использован двухбалочный мостовой кран КМГ-201⁶, установленный в лаборатории кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана [14]. Механизм подъема приводится в движение электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Основные параметры экспериментальной установки приведены в таблице.

При релейно-контакторной системе управления производили подъем с подхватом (двигатель разгоняется до скорости холостого хода на этапе выбора слабины канатов), а при частотной системе управления пуск осуществлялся при выбранной слабине канатов. Таким образом, на доотрывном этапе работы механизма подъема электродвигатель находился в режиме разгона повышением частоты питающего напряжения.

Значения параметров преобразователя частоты: $f_0^{\text{пуск}} = 0$ Гц; $f_k^{\text{пуск}} = 50$ Гц; $t_{\text{пуск}} = 350$ мс.

Производилось измерение усилия в канате накладным тензометрическим датчиком ДНК-1. Параметры аналого-цифрового преобразователя: частота опроса 250 Гц, глубина дискретизации 12 бит. Одновременно производили запись скорости двигателя при помощи тахогенератора.

Теоретическое решение было получено с помощью дифференциальных уравнений для трех этапов:

⁶ Ivanov, S. D. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane / S. D. Ivanov, A. N. Nazarov, N. L. Mikhalechik // Journal of Physics: Conference Series, Belgorod, 09–10 марта 2021 года. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012047. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. EDN JIUUGG.

1 – пуска механизма при ослабленных канатах – формула

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P, \quad (9)$$

где

m_1 [кг] – масса вращающихся частей привода, приведенная к поступательному движению груза;

x_1 [м] – перемещение массы m_1 ;

2 – натяжения канатов до отрыва груза от основания – система

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P - S(c_k(S), \Delta x_k); \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = S(c_k(S), \Delta x_k) - F_m(c_m(x_t)), \end{cases} \quad (10)$$

где

S [Н] – усилие в канатах;

$c_k \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right]$ – жесткость канатов;

Δx_k [м] – текущая деформация канатов;

m_2 [кг] – приведенная масса моста и тележки;

x_2 [м] – перемещение массы m_2 ;

F_m [Н] – усилие в металлоконструкции крана;

$c_m \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right]$ – жесткость металлоконструкции крана;

x_t [м] – координата тележки в пролете,

3 – подъема груза – система

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P - c_k(S_0, l_k) \cdot (x_1 - x_2 - x_3); \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = c_k(S_0, l_k) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - c_m(x_t) \cdot x_2; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = c_k(S_0, l_k) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - m_3 \cdot g, \end{cases} \quad (11)$$

где

S_0 [Н] – статическая составляющая нагрузки усилия в канатах при оторванном от основания грузе;

l_k [м] – длина канатов;

x_3 [м] – координата массы m_3 ;

m_3 [кг] – масса груза.

Комбинация данных этапов полно описывает случаи подъема с подхватом (для релейно-контакторной системы управления) и плавного пуска (для частотной системы управления).

Для повышения качества оценки движущего усилия двигателя эксперимент проводился в условиях, при которых не рассматриваемые в данной работе параметры оказывают наименьшее воздействие на динамический процесс. Тележка располагалась в крайнем положении, вследствие чего динамическая схема фактически преобразовалась из трехмассовой в двухмассовую. Таким образом, в динамическом процессе отсутствует гармоника, соответствующая колебанию приведенной массы моста и тележки, а общая погрешность уменьшилась из-за отсутствия необходимости вычисления динамических параметров и .

Решения для этапов динамического процесса подъема груза получены численным интегрированием по методу Рунге-Кутты-Фельберга, реализованном в библиотеке `scipy` на языке программирования Python [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зная, как изменяются в зависимости от типа регулирования скорости параметры статической механической характеристики (синхронная скорость, критическое скольжение и движущее усилие, соответствующее критическому скольжению), по аналогии с формулой для естественной характеристики получены формулы для искусственных, соответствующих релейно-контакторной системе управления и асинхронным электродвигателем с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной обмотке, а также частотной системе управления и асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором.

Для первого случая использованы формулы (2) и (3). Таким образом, движущее усилие двигателя при ступенчатом управлении приводом имеет вид – формула

$$P_i = 2 \cdot P_K \cdot \dot{x}_c \cdot \left(\frac{R_2 + R_{доб}^i}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \right) \cdot \frac{\dot{x}_c - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c - \dot{x}_1)^2 + \left(\frac{R_2 + R_{доб}^i}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \right)^2 \cdot \dot{x}_c}, \quad i = 1, \dots, k. \quad (12)$$

Для случая частотной системой управления движущее усилие двигателя в случае установившегося движения записывается с учетом формул (2), (4) и (5) и имеет вид формула

$$P_f = \begin{cases} 2 \cdot P_K \cdot s_K^f \cdot \dot{x}_c^f \cdot \frac{\dot{x}_c^f - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c^f - \dot{x}_1)^2 + s_K^{f^2} \cdot \dot{x}_c^f}; \\ \dot{x}_c^f = \frac{f}{f_{ном}} \dot{x}_c^{ном}; & f \in [0, 50 \text{Гц}]; \\ s_K^f = \left[s_K^{ном} + \left(1 - \frac{f}{f_{ном}} \right) \right]; \end{cases} \quad (13)$$

А в случае переходных процессов пуска / торможения движущее усилие двигателя при частотной системе управления записывается с учетом формул (2), (7) и (8) и имеет вид – формула

$$P_{f \text{ пуск/торм}} = \begin{cases} 2 \cdot P_K \cdot s_K^f \cdot \dot{x}_c^f \cdot \frac{\dot{x}_c^f - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c^f - \dot{x}_1)^2 + s_K^{f^2} \cdot \dot{x}_c^f}; \\ \dot{x}_c^f = \frac{f_0^{\text{пуск/торм}} + \frac{f_K^{\text{пуск/торм}} - f_0^{\text{пуск/торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t}{f_{ном}} \dot{x}_c^{ном}, & t \in [0; t_{\text{пуск/торм}}]; \\ s_K^f = s_K^{ном} + \left(1 - \frac{f_0^{\text{пуск/торм}} + \frac{f_K^{\text{пуск/торм}} - f_0^{\text{пуск/торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t}{f_{ном}} \right); \end{cases} \quad (14)$$

На рисунке 5 приведены экспериментальные данные усилия в канате и скорости вращения электродвигателя, соответствующие подъему груза с подхватом при релейно-контакторной системе управления и подъему с упругим подхватом при плавном пуске и частотной системой управления.

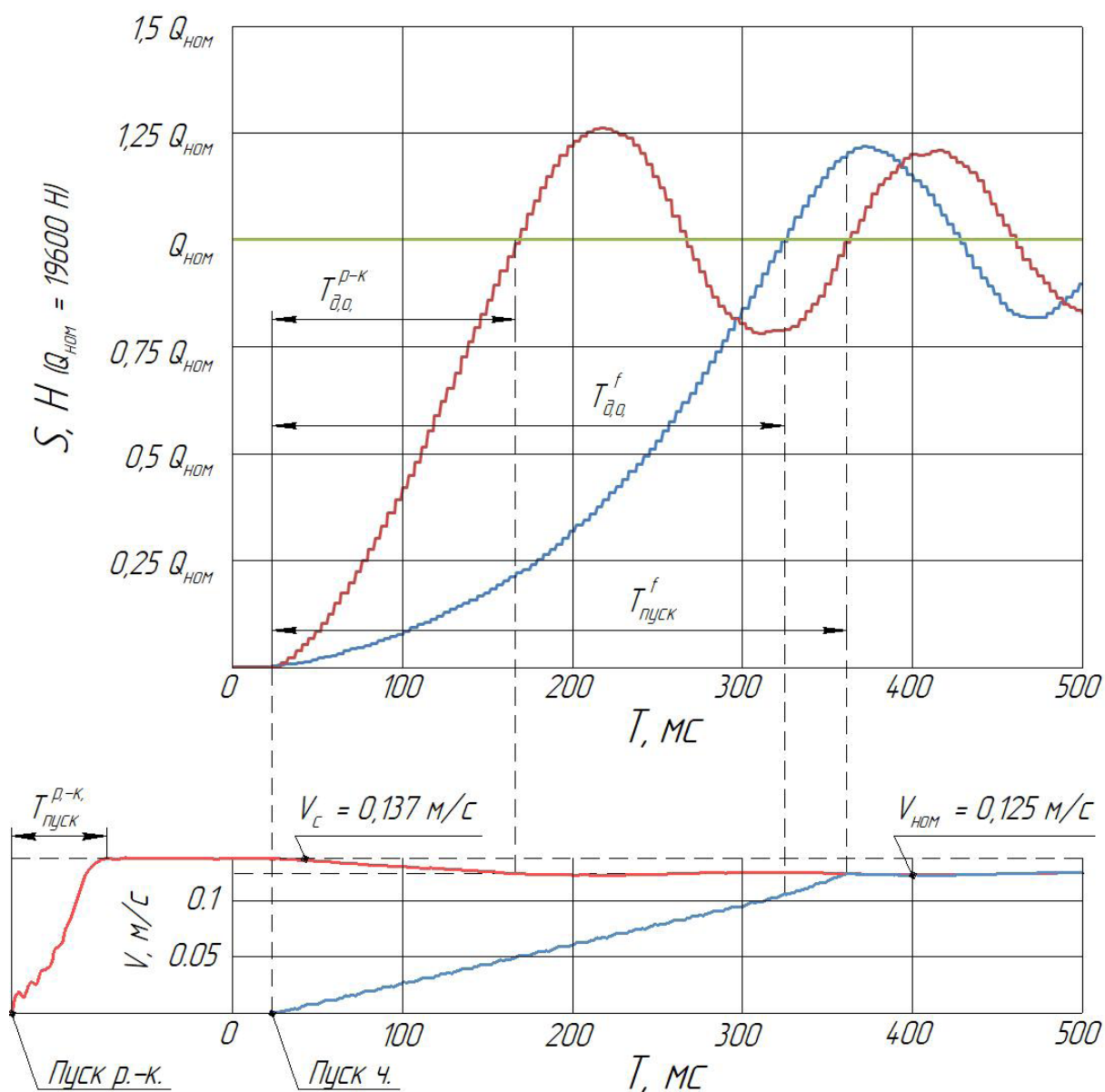


Рисунок 5 – Экспериментальный график усилия в канате и скорости электродвигателя, приведенной к поступательному движению груза, при релейно-контакторной и частотной системе управления;

S – усилие в канате, приведенное к весу груза;

$T_{д.о.}^{р-к}, T_{д.о.}^f$ – время этапа натяжения канатов до отрыва груза от основания при релейно-контакторной и частотной системе управления соответственно;

$T_{пуск}^{р-к}, T_{пуск}^f$ – время пуска при релейно-контакторной и частотной системе управления соответственно;

V_c – синхронная скорость двигателя;

$V_{ном}$ – номинальная скорость двигателя

Источник: составлено автором.

Figure 5 – Experimental graph of the rope force and motor speed applied to the forward motion of the load, with relay-contactor and frequency control system;

S – rope tension, adjusted to the load weight;

$T_{д.о.}^{р-к}, T_{д.о.}^f$ – time of the rope tension stage before the load detaches from the base with relay-contactor and frequency control systems, respectively;

$T_{пуск}^{р-к}, T_{пуск}^f$ – starting time for relay-contactor and frequency control system, respectively;

V_c – synchronous motor speed;

$V_{ном}$ – rated motor speed

Source: compiled by the author.

На основе приведенных характеристик механизма подъема рассчитаны параметры движущего усилия при релейно-контакторной системе управления:

$$P_k = 20.2 \text{ кН}; \dot{x}_c = 0,137 \text{ М/с}; s_k = 0,38;$$

$$P_{\alpha=1} = 5,535 \cdot \frac{0,137 - \dot{x}_1}{(0,137 - \dot{x}_1)^2 + 0,144 \cdot \dot{x}_c};$$

при частотной системе управления (при пуске механизма / в установившемся режиме):

$$\dot{x}_c^f = \begin{cases} 0,391 \cdot t, t \in [0; 0,35]; \\ 0,137, t \in (0,35; t_{\text{топм}}]; \end{cases}$$

$$s_k^f = \begin{cases} 0,38 + (1 - 2,86 \cdot t), t \in [0; 0,35]; \\ 0,38, t \in (0,35; t_{\text{топм}}]; \end{cases}$$

$$P_f = 40,4 \cdot s_k^f \cdot \dot{x}_c^f \cdot \frac{\dot{x}_c^f - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c^f - \dot{x}_1)^2 + s_k^{f2} \cdot \dot{x}_c^f}$$

С помощью систем дифференциальных уравнений (12), (13) и (14) получены решения для соответствующих этапов движения системы. Этапы были сопряжены при помощи граничных условий, в результате получен теоретический график усилия в канатах (рисунок 6):

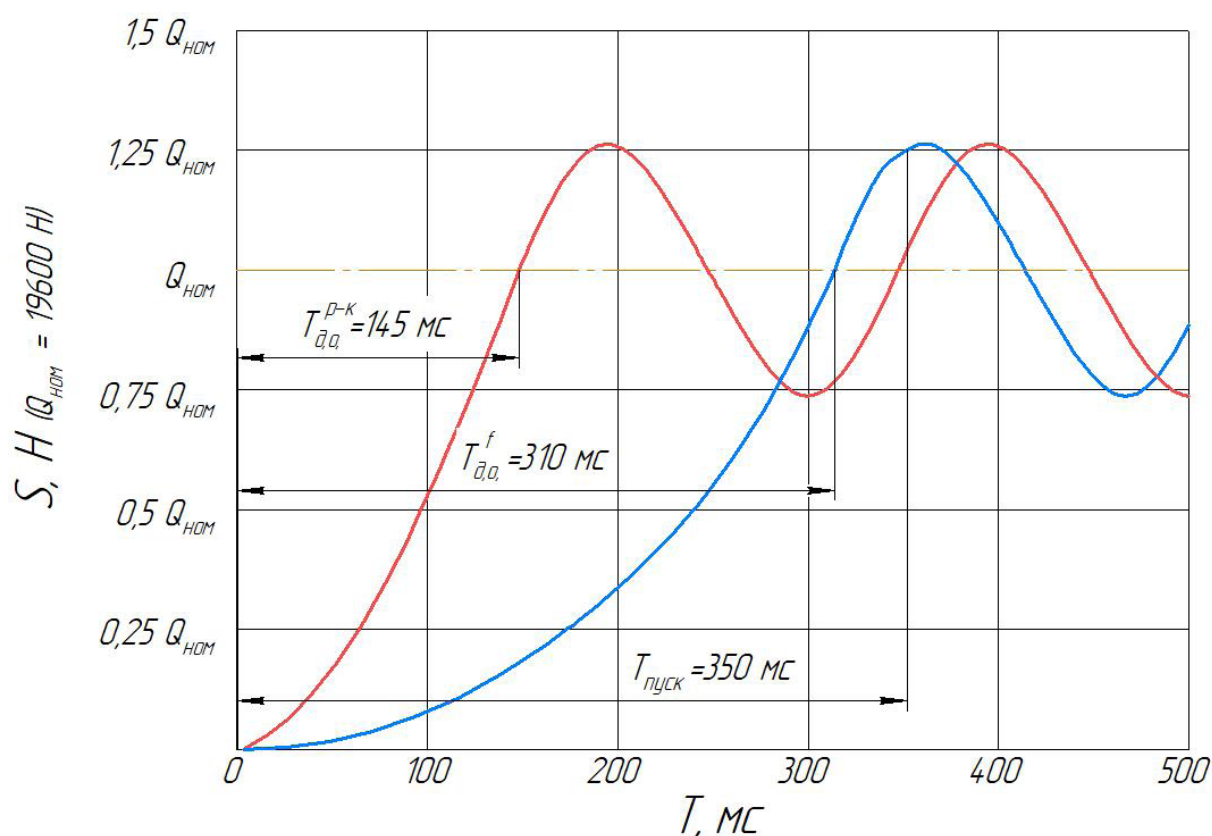


Рисунок 6 – Теоретический график усилия в канате при релейно-контакторной и частотной системе управления
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Theoretical rope tension graph for relay-contactor and frequency control system
Source: compiled by the author.

ВЫВОДЫ

Обоснована применимость статической механической характеристики для описания работы электродвигателя в крановых приводах в силу специфики их конструкции.

В работе получены зависимости, описывающие движущее усилие двигателя крановых приводов с наиболее распространенными системами управления скоростью: релейно-контакторной и односкоростным электродвигателем с короткозамкнутым ротором, электродвигателем с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной цепи и частотной системой управления и электродвигателем с короткозамкнутым ротором.

Представленные зависимости применимы как во время установившегося движения привода, так и во время переходных процессов пуска в случае релейно-контакторной системы управления и пуска / торможения в случае частотой системы управления.

Полученные в работе экспериментальные данные показывают, что при прямом пуске короткозамкнутого двигателя при номинальных параметрах питающей сети присутствуют колебания скорости, однако их амплитуда мала ($\approx 5\%$ от $V_{ном}$) и в практических расчетах динамики крановых приводов может не учитываться.

В зависимости от системы управления и характера управления механизмом подъема значительно отличается интенсивность этапов до отрыва груза от основания. В случаях, изученных экспериментально, продолжительности доотрывных этапов отличались в 2,4 раза. В то же время величина максимальной динамической нагрузки для двух случаев равна, так как к моменту отрыва скорости практически сравнялись.

Из-за незаметного отличия в динамических нагрузках описывать различные системы управления не возникало необходимости. Однако параметр интенсивности нарастания нагрузки и временные составляющие динамических процессов, непосредственно зависящие от системы и режима управления, оказываются определяющими при анализе работы механизма подъема, оснащенного ограничителем грузоподъемности. Используемый современными ограничителями алгоритм прогнозирования нагрузки (алгоритм с промежуточными порогами) сравнивает нагрузку в момент времени, в который прогнозируется ее максимум, с порогом запрета подъема.

Полученные зависимости предоставляют возможность учесть движущее усилие двигателя в алгоритме работы ограничителя грузоподъемности, что повысит качество его работы. Кроме того, параметры, входящие в состав движущего усилия двигателя, являются паспортными величинами электродвигателя, что обуславливает удобство практической применимости полученных зависимостей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мелехина О. В., Хамула М. А., Ломов М. В. Обеспечение безопасности мостовых кранов с высоким сроком службы // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2019. № 1. С. 128–134. EDN YWTVMD.
2. Извеков Ю. А. Научно-методическая база оценки качества технических систем металлургического предприятия // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2021. Т. 19, № 2. С. 98–102. DOI 10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102. EDN WETHMO.
3. Симонова М. А., Новиков А. В. Методика оценки промышленного риска при перемещении грузов грузоподъемными механизмами // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 2(54). С. 203–209. DOI 10.46548/21vek-2021-1054-0040. EDN POVYPP.
4. Будиков Л. Я., Гусев В. В., Шабельников К. В. Анализ динамики разгона и торможения мостовых кранов // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. № 2(88). С. 17–31. EDN FXEFDV.
5. Романова Е. И., Заярный С. Л. Математические модели электропривода кранового механизма // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2019. № 2(24). С. 44–49. EDN EYCDLZ.
6. Описание движения механизмов мостового крана уравнениями Лагранжа II рода / С. С. Енин, Е. Я. Омельченко, А. В. Белый, Н. В. Фомин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2017. Т. 15, № 3. С. 68–73. DOI 10.18503/1995-2732-2017-15-3-68-73. EDN ZGRVAP.
7. Романова Е. И., Заярный С. Л. Математические модели электропривода кранового механизма // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2019. № 2(24). С. 44–49. EDN EYCDLZ.
8. Кулябко В. В. Использование динамических характеристик при формообразовании, конструировании и диагностике сложных сооружений, массивов и сред // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2020. № 1(7). С. 236–245. EDN BWXMJJ.
9. Синельщиков А. В., Панасенко Н. Н. Сравнительный анализ расчетно-динамических моделей портовых кранов на основе одно- и двумерных конечных элементов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия:

Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 127–144. DOI 10.24143/2073-1574-2019-2-127-144. EDN CGAFVJ.

10. Шакаров К. К., Иванов С. Д., Носко Л. Определение параметров математической модели механизма подъема мостового крана, оснащенного ограничителем грузоподъемности // Механизация строительства. 2017. Т. 78, № 6. С. 44–47. EDN YQFTZZ.

11. Семькина И. Ю., Кипервассер М. В., Герасимук А. В. Исследование токов привода подъема мостовых кранов металлургических предприятий для раннего диагностирования превышения массы груза // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 122–131. DOI 10.31897/PMI.2021.1.13. EDN FLZYSZ.

12. Ловейкин В. С., Човнюк Ю. В., Кыдыкало И. А. Уточненный анализ и минимизация динамических нагрузок в упругих элементах грузоподъемных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2016. Т. 15. № 21. С. 354–361. DOI 10.15593/2224-9923/2016.21.7. EDN YKHMAV.

13. Ермоленко В. А., Витчук П. В. Особенности расчета показателей надежности грузоподъемных машин // Надежность. 2016. Т. 16, № 2(57). С. 20–25. EDN WHGDRJ.

14. Иванов С. Д., Назаров А. И. 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.

15. Лобов Н. А. Динамика грузоподъемных кранов. М.: Машиностроение, 1987. 160 с.

16. Шилин А. Н., Арванитаки Н. В., Артюшенко Н. С. Расчет пусковых токов асинхронных электроприводов по схемам замещения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 3. С. 38–42. EDN RXWWAC.

17. Денисов В. А., Третьякова М. Н., Бородин О. А. Сравнительный анализ переходных процессов в асинхронном электродвигателе // Электротехника. 2018. № 3. С. 2–7. EDN VCPNXQ.

18. Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей при низком качестве электроэнергии питающей сети / Ш. Т. Дадабаев, Е. И. Грачева, И. Р. Каримов, С. Валтчев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 1(49). С. 3–15. EDN OOZYKS.

19. Пастухов В. В., Корнеев К. В. Расчет пуска асинхронного двигателя с учетом изменения параметров ротора // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2011. № 5. С. 45–52. EDN OIKGGF.

20. Попов Е. В., Онищенко Г. В. Частотно-регулируемый электропривод механизмов грузоподъемных кранов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3–2. С. 179–184. EDN TBRZDJ.

21. Галкин А. В., Дятчина Д. В. Численное решение математических моделей объектов, задан-

ных составными системами дифференциальных уравнений // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6. С. 127. EDN OQNHJF.

REFERENCES

1. Melehina O. V., Hamula M. A., Lomov M. V. Obespechenie bezopasnosti mostovykh kranov s vysokim srokom sluzhby [Ensuring the safety of bridge cranes with a high service life]. *Jeletkronnyj setevoj politematicheskij zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU"*. 2019; 1:128-134. EDN: YWTVMD. (In Russ.)

2. Izvekov Ju. A. Nauchno-metodicheskaja baza ocenki kachestva tehniceskix sistem metallurgicheskogo predprijatija [Scientific and methodological basis for assessing the quality of technical systems of a metallurgical enterprise]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2021; T. 19. 2: 98-102. DOI 10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102. EDN: WETHMO. (In Russ.)

3. Simonova M. A., Novikov A. V. Metodika ocenki promyshlennogo riska pri peremeshhenii gruzov gruzopod'emnymi mehanizmami [Methodology for assessing industrial risk when moving cargo by lifting mechanisms]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego plus*. 2021; T. 10. no 2(54): 203-209. DOI 10.46548/21vek-2021-1054-0040. EDN: POVYPP. (In Russ.)

4. Budikov L. Ja., Gusev V. V., Shabel'nikov K. V. Analiz dinamiki razgona i tormozhenija mostovykh kranov [Analysis of the dynamics of acceleration and braking of overhead cranes]. *Social'no-jekonomicheskie i tehniceskije sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizacija*. 2021; 2(88): 17-31. EDN: FXEFVD. (In Russ.)

5. Romanova E. I., Zajarnyj S. L. Matematicheskie modeli jeletkroprivoda kranovogo mehanizma [Mathematical models of electric crane mechanism drive]. *Jeletkronnyj zhurnal: nauka, tehnika i obrazovanie*. 2019; 2(24):44-49. EDN: EYCDLZ. (In Russ.)

6. Enin S. S., Omel'chenko E. Ja., Belyj A. V., Fomin N. V. Opisanie dvizhenija mehanizmov mostovogo kрана uravnenijami Lagranzha II roda [Description of the movement of bridge crane mechanisms by Lagrange equations of the second kind]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2017; T. 15. no 3: 68-73. DOI 10.18503/1995-2732-2017-15-3-68-73. EDN ZGRVAP. (In Russ.)

7. Romanova E. I., Zajarnyj S. L. Matematicheskie modeli jeletkroprivoda kranovogo mehanizma [Mathematical models of electric crane mechanism drive]. *Jeletkronnyj zhurnal: nauka, tehnika i obrazovanie*. 2019; 2(24): 44-49. EDN: EYCDLZ. (In Russ.)

8. Kuljabko V. V. Ispol'zovanie dinamicheskix harakteristik pri formoobrazovanii, konstruirovanii i diagnostike slozhnyh sooruzhenij, massivov i sred [The use of dynamic characteristics in shaping, designing and diagnostics of complex structures, arrays and environments]. *Sovremennye innovacionnye tehnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlja gornoj promyshlennosti i transporta*. 2020; 1(7): 236-245. EDN: BWX-MJJ. (In Russ.)

9. Sinel'shnikov A. V., Panasenkov N. N. Sravnitel'nyj analiz raschetno-dinamicheskikh modelej portovykh kranov na osnove odno- i dvumernykh konechnykh jelementov [Comparative analysis of computational and dynamic models of port cranes based on one- and two-dimensional finite elements]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaja tekhnika i tekhnologija*. 2019; 2: 127-144. DOI 10.24143/2073-1574-2019-2-127-144. EDN: CGAFVJ. (In Russ.)
10. Shakarov K. K., Ivanov S. D., Nosko A. L. Opredelenie parametrov matematicheskoy modeli mehanizma pod'ema mostovogo kрана, osnashhennogo ogranichitelem gruzopod'emnosti [Determination of parameters of a mathematical model of the lifting mechanism of a bridge crane equipped with a load capacity limiter]. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2017; T. 78. no 6: 44-47. EDN: YQFTZZ. (In Russ.)
11. Semykina I. Ju., Kipervasser M. V., Gerasimuk A. V. Issledovanie tokov privoda pod'ema mostovykh kranov metallurgicheskikh predpriyatij dlja rannego diagnostirovaniya prevysheniya massy gruzha [Investigation of the lifting drive currents of bridge cranes of metallurgical enterprises for early diagnosis of excess weight of cargo]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2021; T. 247: 122-131. DOI 10.31897/PMI.2021.1.13. EDN: FLZYSZ. (In Russ.)
12. Lovejkin V. S., Chovnjuk Ju. V., Kadykalo I. A. Utochnennyj analiz i minimizacija dinamicheskikh nagruzok v uprugih jelementah gruzopod'emnykh mashin [Refined analysis and minimization of dynamic loads in elastic elements of lifting machines]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologija. Neftgazovoe i gornoe delo*. 2016; T. 15. no 21: 354-361. DOI 10.15593/2224-9923/2016.21.7. EDN: YKHMAY. (In Russ.)
13. Ermolenko V. A., Vitshuk P. V. Osobennosti rascheta pokazatelej nadezhnosti gruzopod'emnykh mashin [Features of calculating reliability indicators of lifting machines]. 2016; T. 16. no 2(57): 20-25. EDN: WHGDRJ. (In Russ.)
14. 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.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>
15. Lobov N. A. *Dinamika gruzopod'emnykh kranov* [Dynamics of lifting cranes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987:160.
16. Shilin A. N., Arvanitaki N. V., Artjushenko N. S. Raschet puskovykh tokov asinhronnykh jelektroprivodov po shemam zameshheniya [Calculation of starting currents of asynchronous electric drives according to substitution schemes]. *Jelektro. Jeletrotehnika, jeletroenergetika, jeletrotehnicheskaja promyshlennost'*. 2015; 3: 38-42. EDN: RXWWAC. (In Russ.)
17. Denisov V. A., Tret'jakova M. N., Borodin O. A. Sravnitel'nyj analiz perehodnykh processov v asinhronnom jelektrodvigatele []. *Jeletrotehnika*. 2018; 3: 2-7. EDN: VCPNXQ. (In Russ.)
18. Dadabaev Sh. T., Gracheva E. I., Karimov I. R., Valtchev S. Issledovanie puskovykh rezhimov asinhronnykh dvigatelej pri nizkom kachestve jelektroenergii pitajushhej seti [Comparative analysis of transients in an asynchronous electric motor]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta*. 2021; T. 13. № 1(49): 3-15. EDN OOZYKS. (In Russ.)
19. Pastuhov V. V., Korneev K. V. Raschet puska asinhronnogo dvigatelja s uchedom izmeneniya parametrov rotora [Investigation of starting modes of asynchronous motors at low quality of power supply network]. *Jelektro. Jeletrotehnika, jeletroenergetika, jeletrotehnicheskaja promyshlennost'*. 2011; 5: 45-52. EDN: OIKGGF. (In Russ.)
20. Popov E. V., Onishhenko G. B. Chastotno-reguliruemyj jelektroprivod mehanizmov gruzopod'jomnykh kranov [Calculation of asynchronous motor start taking into account changes in rotor parameters]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2010; 3-2: 179-184. EDN: TBRZDJ. (In Russ.)
21. Galkin A. V., Djatchina D. V. Chislennoe reshение matematicheskikh modelej ob'ektov, zadannykh sostavnymi sistemami differencial'nykh uravnenij [Numerical solution of mathematical models of objects given by composite systems of differential equations]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2011; 6: 127. EDN OQNHJF. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Назаров Александр Николаевич – аспирант, ассистент кафедры «Подъемно-транспортные системы», SPIN-код: 2028-7651.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexander N. Nazarov –Postgraduate student, Assistant of the Lifting and Transport Systems Department, SPIN-код: 2028-7651.