

**Бурков Петр Владимирович<sup>1,2</sup>**, доктор техн. наук, профессор, **Бурков Владимир Петрович<sup>1</sup>**, ассистент, **Тимофеев Вадим Юрьевич<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доцент, **Буркова Светлана Петровна<sup>1</sup>**, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 30

<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2

E-mail: burkovpv@mail.ru

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА СПЕКТРАЛЬНЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### **Аннотация:**

*В статье представлено обоснование применения аппарата спектральных разложений для разработки математической модели электромеханической системы лебедки барабанного типа с асинхронным электродвигателем в качестве привода. Описана методика получения математической модели работы лебедки с электроприводом с импульсной переходной характеристикой. Представлены требования к математической модели работы лебедки, результаты математического моделирования и натурных экспериментов. Математическое моделирование показывает пропорциональное изменение потребляемой мощности, усилия в полиспасте, электромагнитного момента, частоты вращения ротора в зависимости от времени и этапа подъема груза. Результаты натурных испытаний лебедки барабанного типа при условиях, аналогичных математическому моделированию, показывают, что математическая модель адекватна. На основе результатов моделирования предложено использовать новый способ нахождения величины коэффициента режима нагружения для определения режима работы лебедки барабанного типа.*

**Ключевые слова:** лебедка барабанного типа, асинхронный электродвигатель, электромеханическая система, импульсная переходная характеристика, математическая модель, экспериментальные испытания, коэффициент режима нагружения, потребляемая мощность, частота вращения ротора электродвигателя, усилие на полиспасте.

**Информация о статье:** принята 01 февраля 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-54-62

### **Актуальность работы (The urgency of the discussed issue):**

Современные электромеханические системы (ЭМС) грузоподъемных машин (ГПМ) используемых в горной промышленности являются сложной многокомпонентной совокупностью связанных между собой технических подсистем [1, 2]. Российские и зарубежные предприятия при выпуске ГПМ уже продолжительное время следуют тенденциям роста их производительности и энерговооруженности, что влечет за собой увеличение динамических нагрузок, снижение надежности и экономичности [2, 3, 4, 5, 6]. Разработка более рациональных конструкций ГПМ и определение параметров возможны только при анализе динамики воздействующих на нее силовых факторов, как внешних, так и внутренних. Таким образом, создание математических моделей ЭМС и исследование их свойств с целью повышения показателей надежности является актуальной научно-практической задачей.

### **Цель работы (The main aim of the study):**

Разработка и исследование математической модели ЭМС ГПМ с применением аппарата

спектральных разложений с целью определения динамических характеристик.

### **Постановка задачи (The wording of the problem):**

Динамические характеристики ЭМС ГПМ под воздействием внешних факторов существенно изменяются, что является следствием динамического характера нагрузок и особенностями технологических процессов его работы, и соответственно приводит к снижению надежности и производительности [7, 8, 9, 10]. Поэтому задача создания математического обеспечения для определения динамических характеристик ЭМС ГПМ применяемых в горной промышленности, является актуальной научно-практической задачей.

Задачи такого рода относятся к классу задач динамики машин и механизмов, и решаются с помощью математического моделирования, посредством систем дифференциальных или интегральных уравнений, которые описывают динамические процессы внутри создаваемого технического объекта [11, 12, 13]. Разработка таких математических моделей происходит за счет включения в общую структурную

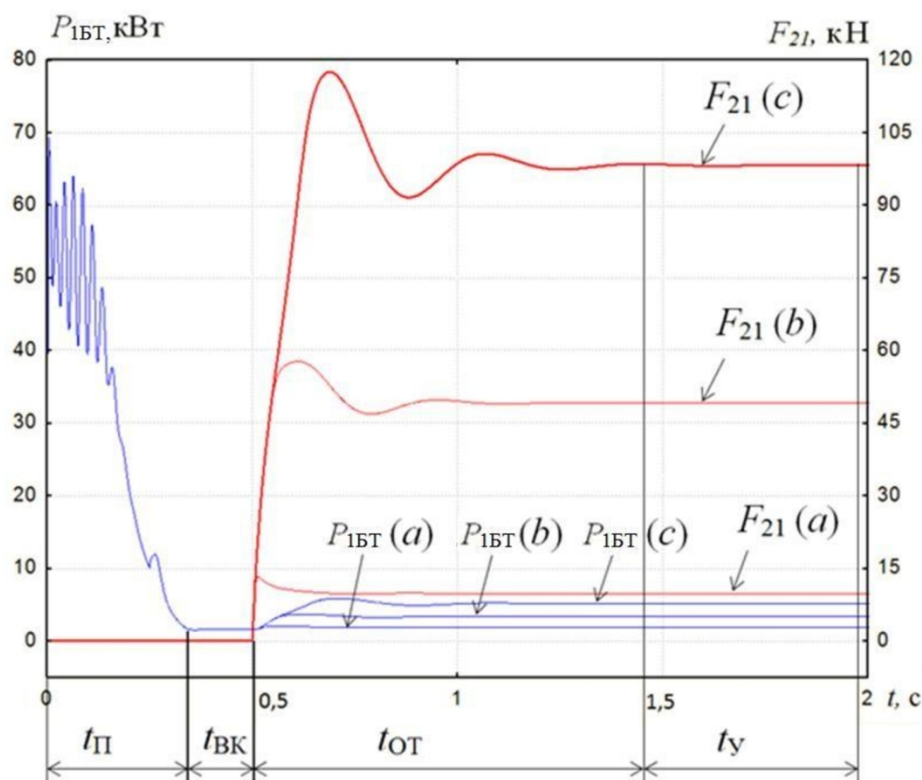


Рис. 1. Зависимости электромеханических переменных (потребляемая мощность и усилие в полиспасте) в лебедке БТ от времени подъема груза

$t_{\Pi}$  – период подъема груза, с;  $t_{BK}$  – период выбора лебедкой слабину каната, с;  $t_{OT}$  – период отрыва груза, с;  $t_Y$  – период установившегося подъема, с;  $P_{1BT}$  – потребляемая активная мощность электрического привода, кВт;  $F_{21}$  – усилие в полиспасте лебедки, кН; индексы (a), (b), (c) обозначают массу груза 1000, 5000, 10000 кг соответственно.

Fig. 1. Dependences of electromechanical variables (power consumption and force in the pulley block) in the drum-type winch

$t_{\Pi}$  – the period of lifting of loads, sec;  $t_{BK}$  – the period of hoist rope slack, sec;  $t_{OT}$  – the period of separation of loads, sec;  $t_Y$  – period steady-state lift, sec;  $P_{1BT}$  – active power consumption of electric drive, kW;  $F_{21}$  – the force in chain block hoist, kN; indices (a), (b), (c) denote the weight of the load 1000, 5000, 10000 kg, respectively.

схему новых уравнений, которые добавляют описание новых отдельных компонентов ЭМС, а также описывают топологическую увязку взаимодействия между ее компонентами. В процессе создания математического описания (модели) проектировщик или исследователь должен определиться с уровнем ее детализации, т.к. это оказывает существенное влияние на достоверность полученных результатов [12, 13, 14]. Также необходимо выделить и исключить из расчетов компоненты и процессы, характеристики которых не оказывают влияние на динамику ЭМС ГПМ в целом. Для верификации полученной математической модели проводятся экспериментальные исследования путем проведения натурных испытаний с реальным техническим объектом [13, 14, 15].

#### Методы исследования и математическое моделирование (The methods used in the study and mathematical modeling):

В последние десятилетие в связи с интенсивным развитием вычислительных мощностей развитие получили методы создания моделирующих систем на основе динамических характеристик систем и спектрального представления сигналов, в которых в качестве функциональных и проекционных базисов

все чаще используют не тригонометрические функции [13, 14, 15]. Разнообразие свойств ЭМС ГПМ горных производств формируется их назначением, тем самым определяя задачу выбора их динамических характеристик, идентификация которых, в свою очередь, позволяет составить соответствующую математическую модель [12, 13]. При детальном рассмотрении класса динамических характеристик ЭМС ГПМ необходимо различать переходную характеристику и импульсную переходную характеристику (ИПХ), а также автокорреляцию и взаимокорреляцию функций. Наиболее универсальной является импульсная переходная характеристика поэтому на ее базе формируются ядра интегральных уравнений. График ИПХ определяет передаточную функцию ЭМС в пространстве преобразования Лапласа [12, 13, 14]. При таком подходе возникают две задачи: непараметрической и параметрической идентификации импульсной переходной характеристики ЭМС. Непараметрическая идентификация заключается в определении в интегральных уравнениях вырожденных ядер (в виде сумм Фурье), что позволяет в базисах заранее определенных функций установить их спектральные характеристики [15,

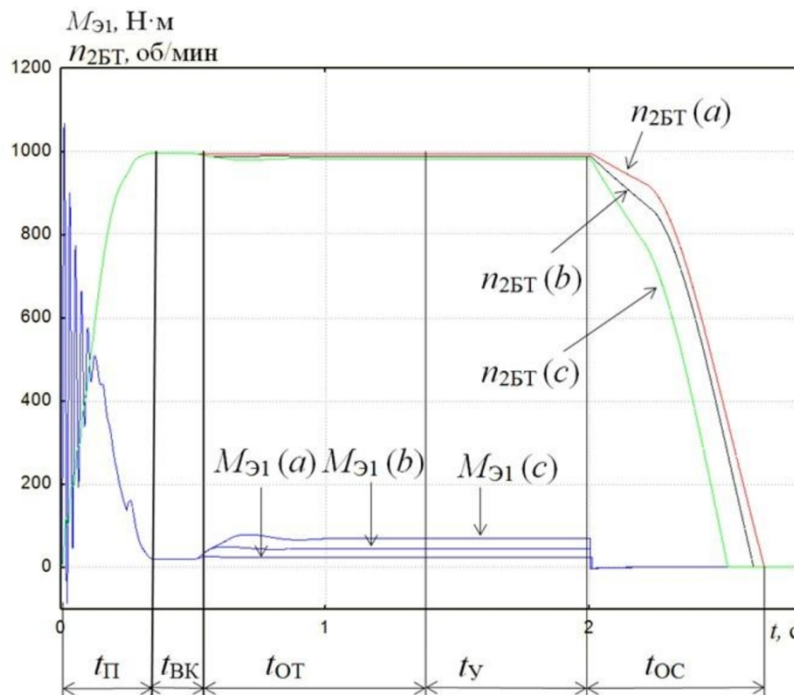


Рис. 2. Зависимости электромеханических переменных (электромагнитного момента и частоты вращения) в лебедке БТ от времени подъема груза

$t_{\text{П}}$  – период подъема груза, с;  $t_{\text{ВК}}$  – период выбора лебедкой слабину каната, с;  $t_{\text{ОТ}}$  – период отрыва груза, с;  $t_{\text{У}}$  – период установившегося подъема, с;  $t_{\text{ОС}}$  – период остановки лебедки, с;  $M_{\text{Э1}}$  – электромагнитный момент, Н·м;  $n_{2\text{БТ}}$  – частота вращения ротора электродвигателя, мин<sup>-1</sup>; индексы (a), (b), (c) обозначают массу груза 1000, 5000, 10000 кг соответственно.

Fig. 2. Dependences of electromechanical variables (electromagnetic torque and frequency of rotation) in a drum-type winch  $t_{\text{П}}$  – the period of lifting of loads, sec;  $t_{\text{ВК}}$  – the period of hoist rope slack, sec;  $t_{\text{ОТ}}$  – period of separation of loads;  $t_{\text{У}}$  – period steady-state lift, sec;  $t_{\text{ОС}}$  – stop period of the winch, sec;  $M_{\text{Э1}}$  – electromagnetic torque, N·m;  $n_{2\text{БТ}}$  – frequency of rotation of the rotor of the electric motor, min<sup>-1</sup>; the indices (a), (b), (c) denote the mass of the load 1000, 5000, 10000 kg, respectively.

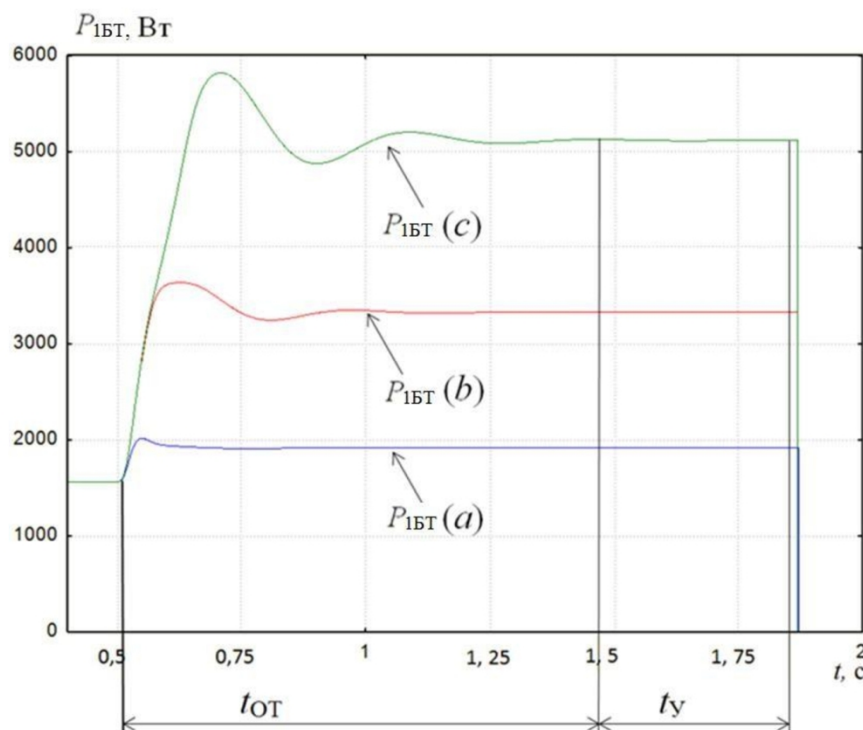


Рис. 3. Зависимость потребляемой активной мощности в лебедке БТ от времени подъема груза  $t_{\text{ОТ}}$  – период отрыва груза, с;  $t_{\text{У}}$  – период установившегося подъема, с;  $P_{1\text{БТ}}$  – потребляемая активная мощность электрического привода, кВт; индексы (a), (b), (c) обозначают массу груза 1000, 5000, 10000 кг соответственно.

Fig. 3. Dependence of the active power consumption in the drum type winch  $t_{\text{ОТ}}$  – period of separation of loads;  $t_{\text{У}}$  – period steady-state lift, sec;  $P_{1\text{БТ}}$  – active power consumption of electric drive, kW; the indices (a), (b), (c) denote the mass of the load 1000, 5000, 10000 kg, respectively.



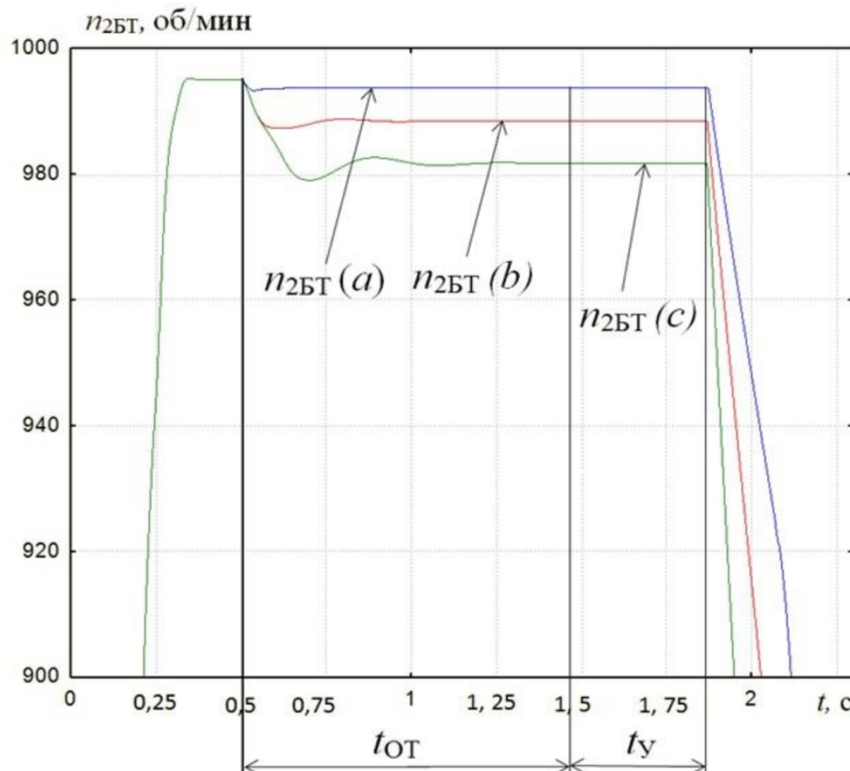


Рис. 4. График изменения частоты вращения ротора двигателя лебедки БТ в зависимости от времени подъема груза

$t_{OT}$  – период отрыва груза, с;  $t_Y$  – период установившегося подъема, с;  $n_{2БТ}$  – частота вращения ротора электродвигателя, мин<sup>-1</sup>; индексы (a), (b), (c) обозначают массу груза 1000, 5000, 10000 кг соответственно.

Fig. 4. Dependence of the active power consumption in the drum type winch on time  
 $t_{OT}$  – period of separation of loads;  $t_Y$  – period steady-state lift, sec;  $n_{2БТ}$  – frequency of rotation of the rotor of the electric motor, min<sup>-1</sup>; the indices (a), (b), (c) denote the mass of the load 1000, 5000, 10000 kg, respectively.

16]. Параметрическая идентификация заключается в нахождении параметров идентификации импульсной переходной характеристики ЭМС, которая и является передаточной функцией [12, 13, 14, 15, 16]. Нахождение ИПХ ЭМС производится на базе уже установленных зависимостей, выявляющих взаимосвязь между параметрами импульсной переходной характеристики ЭМС и компонентами спектральной характеристики ЭМС. В этом случае система функций Фурье, разложение в базисе которых создает спектральную характеристику импульсной переходной характеристики ЭМС, формирует функциональные и модельно-проекционные оболочки [14].

Для создания математической модели определим требования к функциональным и ортогональным модельно-проекционным оболочкам, используемым для построения моделей ИПХ ЭМС ГПМ:

1. Компоненты системы должны удовлетворять условию:

$$\int_0^\infty \psi_i(x) dx \neq \infty \quad (1)$$

где  $\psi_i(x)$  – компонент функциональной и модельно-проекционной оболочки.

2. Функциональная оболочка должна иметь ортонормированные свойства.

3. При условии выполнения требований к импульсной переходной характеристике, реализуемых физически ЭМС, интервал ортогональности таких

систем должен быть больше интервала определения ИПХ устойчивых ЭМС.

Математическая модель работы лебедки барабанного типа (БТ) представлена в работе [18]. На рисунках 1–4 показаны результаты моделирования работы лебедки БТ при работе на кране МК-10 при спуске в установившемся режиме при поочередном подъеме грузов массой 1000, 5000 и 10000 кг.

Далее представлено изменение частоты вращения ротора асинхронного двигателя и электромагнитного момента в зависимости от времени подъема груза (рис. 2).

Исходя из полученных зависимостей 1–4 можно сказать, что, величины  $P_{1БТ}$  и  $n_{2БТ}$  в момент отрыва груза и в установившемся режиме, прямо пропорциональны изменению усилия в полиспасте лебедки БТ, поэтому возможно определить коэффициент режима нагружения  $k_m$  как:

$$k_m = \sum \left( \frac{P_i}{P_{НОМ}} \right)^{m_B} \cdot \frac{t_i}{\sum t_i} \quad (2)$$

где  $P_i$  – активная мощность электропривода лебедки БТ при подъеме груза массой  $Q_i$ , Вт;

$P_{НОМ}$  – активная мощность электропривода лебедки БТ при подъеме груза номинальной массой  $Q_{НОМ}$ , Вт;

$t_i$  – интервал времени действия нагрузки, с.



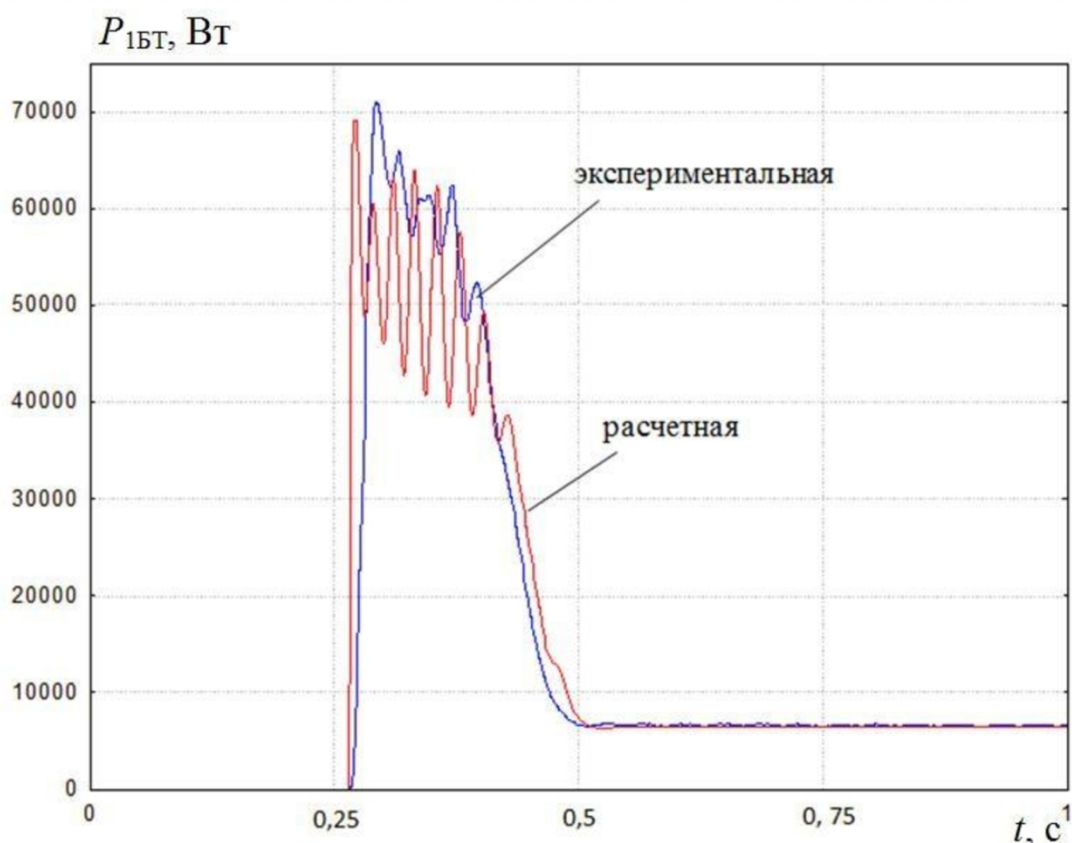


Рис. 5. Расчетная и экспериментальная зависимости величины потребляемой мощности  $P_{1BT}$  на участке подъема груза  $t_{п}$

Fig. 5. The calculated and experimental dependences of power consumption on the site  $P_{1BT}$  lifting  $t_p$

В данном случае для  $P_i$  должно быть соблюдено условие:

$$P_i = P_{1BT} - P_{X.X.} \quad (3)$$

где  $P_{X.X.}$  – величина активной мощности электропривода лебедки БТ на холостом ходу, Вт.

Исходя из (2) и (3) ясно, что само значение коэффициента  $k_m$  не изменится, т.к. отношения мощностей при  $i$ -ой нагрузке и при номинальном значении, будет равным отношению массы  $i$ -го груза к номинальной массе:

$$\frac{P_i}{P_{НОМ}} = \frac{Q_i}{Q_{НОМ}} \quad (4)$$

Однако сам результат будет более точным, т.к. будет получен на основе более точных исходных данных.

Далее сравним результат, полученный при помощи математического моделирования с результатом натурного испытания, полученного при проведении аналогичного эксперимента. На рисунке 5 показаны расчетная и экспериментальная зависимости величины потребляемой мощности  $P_{1BT}$  на участке подъема груза  $t_{п}$  полученные математическим моделированием и в результате экспериментальных исследований на кране МК-10 лебедки БТ [13].

Сравним экспериментальные параметры усилия в полиспасте  $F_{21}$  лебедки БТ с параметрами, полученными в результате математического моделирования (рис. 6).

Далее сравним результаты натурного эксперимента по определению частота вращения ротора электродвигателя  $n_{БТ}$  с результатами математического моделирования (рис. 7).

Экспериментальные и расчетные зависимости величины потребляемой мощности  $P_{1BT}$ , величины усилия в полиспасте лебедки  $F_{21}$  и частота вращения ротора электродвигателя  $n_{БТ}$  на участке подъема груза  $t_{п}$  были сравнены по критерию Фишера, в результате было выявлено, что отклонение не превышает 9% для все трех параметров.

#### Результаты (The results):

Полученная математическая модель электрической грузоподъемной лебедки БТ основанная на применении аппарата спектральных разложений позволяет исследовать статические и динамические режимы работы лебедки при различных эксплуатационных воздействиях в разных периодах подъема груза. Для определения режима нагружения лебедки БТ применяется коэффициент нагружения  $k_m$ , для расчета которого используется активная потребляемая мощность электропривода  $P_{1BT}$  измеренная в установившемся режиме работы лебедки. Результаты математического моделирования сравнивались с результатами, полученными в ходе натурных экспериментов, отклонение данных не превышает 9%, что позволяет считать модель адекватной. Полученная математическая модель обосновывает возможность применения зависимостей величин электро-механических переменных приводных асинхронных двигателей для контроля технического состояния грузоподъемных лебедок, что позволит повысить безопасность их использования и снизить энергозатраты.

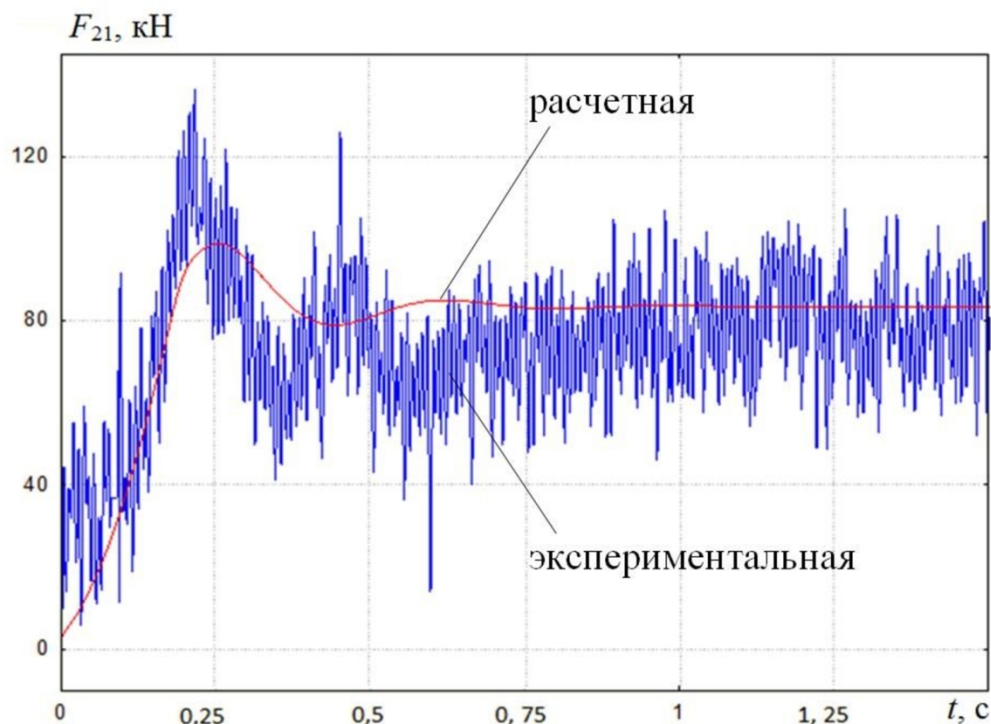


Рис. 6. Расчетная и экспериментальная зависимости величины усилия в полиспасте лебедки  $F_{21}$  на участке подъема груза  $t_{\Pi}$

Fig. 6. The calculated and experimental dependences of the magnitude of the force in the chain block hoist  $F_{21}$  at the section of the cargo lifting  $t_P$

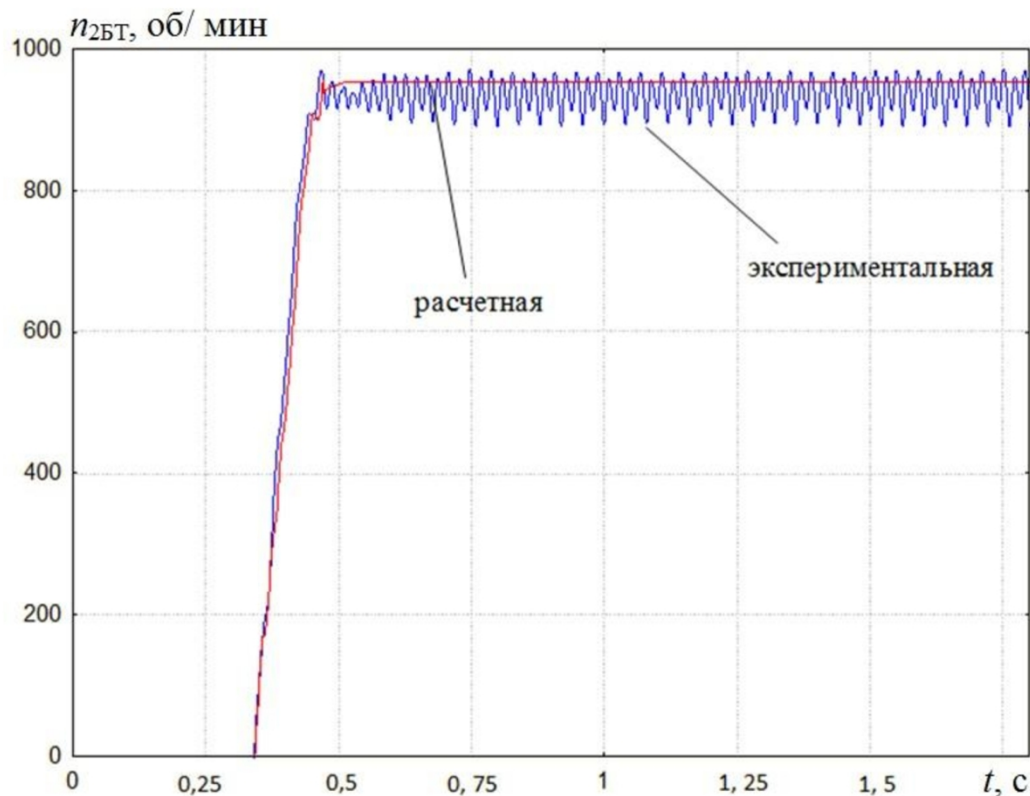


Рис. 7. Расчетная и экспериментальная зависимости величины частота вращения ротора электродвигателя  $n_{2BT}$  на участке подъема груза  $t_{\Pi}$

Fig. 7. The calculated and experimental dependences of the magnitude of the frequency of rotation of the rotor of the electric motor  $n_{2BT}$  on the part of the lifting  $t_P$

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колодин А. П. Определение области рационального использования станков с различными типами приводов для бурения скважин из подземных горных выработок / А. В. Шадрина, Л. А. Саруев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов : науч. тр. / ТПУ. – Томск, 2011. – Т. 319. – №. 1. – С. 191-195.
2. Орлов Ю. А. Совершенствование системы защиты и контроля технического состояния электро-механической системы крана мостового типа / Д. П. Столяров, В. П. Бурков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) : науч. тр. / Горная книга. М., 2011. – №. S2. – С. 363-368.
3. Повышение эффективности крепления подвесных узлов монорельсовых дорог и лебёдок в подземных горных выработках / П. В. Гречишкин [и др.] // Маркшейдерия и недропользование : науч. тр. / Геомар Недр. – М., 2013. – №. 2. – С. 45-48.
4. Абрамов Б. Н. К вопросу повышения тяговой способности лебёдок лифтов с канатоведущими шкивами / К. Д. Сипугин // Механизация строительства : науч. тр. / Библио-Глобус. М., 2017. – Т. 78. – №. 6. – С. 36-39.
5. Huang J. Study of control mode and control strategy for direct drive volume control actuating unit of heave compensation winch / Xiao T., Chen L. // Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2017 IEEE International Conference on, 2017. – P. 576-580. DOI: 10.1109/ICCIS.2017.8274841.
6. Направления исследований по повышению ресурса узлов трения в приводах скиповых лебёдок доменного цеха ОАО «ММК» / Е. И. Мироненков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова : науч. тр. / МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2008. – №. 3. – С. 46-48.
7. Динамика электрической подъемной лебедки / Н. Л. Великанов [и др.] // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки : науч. тр. / БФУ им. И. Канта. – Калининград, 2017. – Т. 78. – №. 8. – С. 91-100.
8. Yunfei-Chen. Simulation research of heave compensation winch based on virtual prototype / Tbing-Xiao, Lei-Chen // 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2017. – P. 620-625. DOI: 10.1109/ICCIS.2017.8274849.
9. Электропривод буровой лебёдки на базе машины двойного питания / В. И. Бабакин [и др.] // Академический журнал Западной Сибири : науч. тр. / М-центр. – Тюмень, 2014. – Т. 10. – №. 4. – С. 36-38.
10. Granda, J. J. The role of bond graph modeling and simulation in mechatronics systems: An integrated software tool: CAMP-G, MATLAB–SIMULINK // Mechatronics, 2002. V. 12. – №. 9-10. – P. 1271-1295.
11. Шадрина, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования волновых процессов в колонне труб при бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок : дис. ... д-р техн. наук – ТПУ, Томск, 2014.
12. Петров, В. Л. Математическое моделирование электромеханических систем горных машин на основе идентификации динамических характеристик : дис. ... д-р техн. наук – МГТУ, Москва, 2004.
13. Кахиев, Р. Н. Электроприводы грузоподъемных лебедок с повышенной безопасностью : дис. ... канд. техн. наук – ТГАСУ, Томск, 2016.
14. Петров, В. Л. Исследование свойств спектральных моделей электромеханических систем горных машин в базисе ортонормированных функций Чебышева-Эрмита // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) : науч. тр. / Горная книга. М., 2012. – №. 1. – С. 331-334.
15. Петров, В. Л. Обоснование ортонормированных функций для классов спектральных моделей электромеханических систем, характеризующихся различной степенью колебательности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) : науч. тр. / Горная книга. М., 2013. – №. 5. – С. 162-173.
16. Бурков В. П. Определение параметров регуляторов в управляемой электромеханической системе на основе спектральной модели в базисе функций Чебышева-Лежандра / В. Л. Петров // Горные науки и технологии : науч. тр. / МИСИС. – М., 2011. – №. 12. – С. 14-19.
17. Белоглазов, И. И. Применение метода дискретных элементов для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке / Д. А. Иконников // Известия высших учебных заведений. Приборостроение : науч. тр. / ИТМО. – Санкт-Петербург, 2016. – Т. 59. – №. 9. – С. 780-786.
18. Математическое моделирование электромеханических систем станков для бурения скважин с различными типами приводов / П. В. Бурков [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – №. 5 – С. 3-10.

**Petr V. Burkov**<sup>1,2</sup>, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Vladimir P. Burkov**<sup>1</sup>, Assistant, **Vadim Yu. Timofeev**<sup>1</sup>, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Svetlana P. Burkova**<sup>1</sup>, C. Sc. in Engineering

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation.



## THE RATIONALE FOR THE USE OF SPECTRAL EXPANSION APPARATUS FOR MODELLING THE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

**Abstract:** the paper presents the rationale for the use of spectral decomposition apparatus for the development of a mathematical model of the electromechanical system of a drum-type winch with an asynchronous motor as a drive. The technique of obtaining a mathematical model of the winch with electric drive on the basis of pulse transient response is described. The requirements for the mathematical model of the winch and the results of mathematical modeling are presented. The results of mathematical modeling show a proportional change in power consumption, the effort in the polispast, electromagnetic torque, rotor speed, depending on the time and stage of lifting. The results of full-scale tests of the drum-type winch under conditions similar to mathematical modeling show that the mathematical model is adequate. On the basis of the simulation results, it is proposed to use the new method of finding the value of the loading mode coefficient to determine the operating mode of the drum-type winch.

**Keywords:** drum type winch, induction motor, electromechanical system, pulse transient response, mathematical model, experimental test, the coefficient of loading conditions, power consumption, rotational speed of the rotor of the electric motor, the force on the pulley.

**Article info:** received February 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-54-62

### REFERENCES

1. Kolodin A.P., SHadrina A.V., Saruev L.A. Opre-delenie oblasti racional'nogo ispol'zovaniya stankov s razlichnymi tipami privodov dlya bureniya skvazhin iz podzemnyh gornyh vyrabotok [Determination of the rational use of machines with different types of drives for drilling wells from underground mining]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo-resources]. 2011. No. 1. Vol. 319. P. 191-195.
2. Orlov Yu.A., Stolyarov D.P., Burkov V.P. Sovershenstvovanie sistemy zashchity i kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya ehlektromekhanicheskoy sistemy krana mostovogo tipa [Improvement of the system of protection and control of the technical condition of the Electromechanical system of the bridge crane]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2011. No. S2. P. 363-368.
3. Grechishkin P.V., Pozolotim A.S., Rajko G.V., Samok A.V., Balandin N.N. Povyshenie ehffektivnosti krepleniya podvesnyh uzlov monorel'sovyh dorog i le-byodok v podzemnyh gornyh vyrabotkah [Improving the efficiency of fastening of the suspended nodes of roads and monorail hoists in underground mining]. Markshejderiya i nedropol'zovanie [Mine surveying and subsoil use]. 2013. No. 2. P. 45-48.
4. Abramov B.N., Sipugin K. D., K voprosu pov-ysheniya tyagovoj sposobnosti lebyodok liftov s kana-tovedushchimi shkivami [The problem of improving the traction capability of winches elevators with traction sheave]. Mekhanizatsiya stroitel'stva [Mechanization of construction]. 2017. No. 6. Vol. 78. P. 36-39.
5. Huang J., Xiao T., Chen L. Study of control mode and control strategy for direct drive volume control actuating unit of heave compensation winch // Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). 2017. P. 576-580.
6. Mironenkov E.I., ZHirkin YU.V., CHumikov A.M., Platov S.I. Napravleniya issledovaniy po pov-ysheniyu resursa uzlov treniya v privodah skipovyh le-byodok domennogo cekha OAO «MMK» [Areas of re-search to improve the resource of friction units in the drives of skip winches of the blast furnace shop of MMK Ltd.]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova [Bulletin of Magnitogorsk state technical University named after G. I. Nosov]. 2008. No. 3. P. 46-48.
7. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A., Ahmedov I.M. Dinamika sistemy pod"ema gruzha [Dy-namics of electric hoist]. Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskije nauki [Bulletin of the Bal-tic Federal University named after I. Kant. Series: Phys-ical, mathematical and technical Sciences]. 2017. No. 8. Vol. 78. P. 91-100.
8. Yunfei-Chen, Tibing-Xiao, Lei-Chen. Simulation research of heave compensation winch based on virtual prototype // 2017 IEEE International Conference on Cy-bernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Con-ference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). 2017. P. 620-625.
9. Babakin V.I., Izotova E.V., Ulyaev R.I., Hisametdinov R.A. Elektroprivod burovoj lebyodki na baze mashiny dvojnogo pitaniya [Electric drive of drill-ing winch on the basis of double-feed machine]. Akad-emicheskij zhurnal Zapadnoj Sibiri [Academic journal of Western Siberia]. 2014. No. 4. Vol. 10. P. 36-38.

10. Granda, J. J. The role of bond graph modeling and simulation in mechatronics systems: An integrated software tool: CAMP-G, MATLAB–SIMULINK // *Mechatronics*, 2002. Vol. 12. No. 9-10. P. 1271-1295.

11. SHadrina A.V. Teoreticheskie i ehksperimental'nye issledovaniya volnovykh processov v kolonne trub pri burenii skvazhin malogo diametra iz podzemnykh gornyx vyrabotok [Theoretical and experimental studies of wave processes in a pipe column during drilling of small diameter wells from underground mine workings]. Tomsk, Publishing of the Tomsk Polytechnic University, 2011. 273 P.

12. Petrov V.L. Matematicheskoe modelirovanie ehlektromekhanicheskikh sistem gornyx mashin na osnove identifikatsii dinamicheskikh harakteristik [Mathematical modeling of Electromechanical systems of mining machines on the basis of identification of dynamic characteristics]. Moscow, Publishing of the Moscow State Mining University, 2004. 281 P.

13. Kahiev R.N. Elektroprivody gruzopod'emnykh lebedok s povyshennoy bezopasnost'yu [Electric drives of hoisting winches with increased safety]. Tomsk, Publishing of the Tomsk state University of architecture and civil engineering, 2016. 123 P.

14. Petrov V.L. Issledovanie svoystv spektral'nykh modelej ehlektromekhanicheskikh sistem gornyx mashin v bazise ortonormirovannykh funktsiy Chebysheva-Hermitya [Investigation of the properties of spectral models of Electromechanical systems of mining machines in the basis of orthonormal Chebyshev-Hermite functions]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2012. No. 1. P. 331-334.

15. Petrov V.L. Obosnovanie ortonormirovannykh funktsiy dlya klassov spektral'nykh modelej

ehlektromekhanicheskikh sistem, harakterizuyushchihsya razlichnoy stepen'yu kolebatel'nosti [Justification of orthonormal functions for classes of spectral models of Electromechanical systems characterized by varying degrees of oscillation]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2013. No. 5. P. 162-173.

16. Burkov V.P., Petrov V.L. Opreделение parametrov regulyatorov v upravlyaemoj ehlektromekhanicheskoy sisteme na osnove spektral'noy modeli v bazise funktsiy Chebysheva-Lezhandra [Determination of parameters of regulators in a controlled Electromechanical system based on the spectral model in the basis of Chebyshev-Legendre functions]. *Gornye nauki i tekhnologii* [Mining science and technology]. 2011. No. 12. P. 14-19.

17. Beloglazov I.I., Ikonnikov D.A. Primenenie metoda diskretnykh ehlementov dlya modelirovaniya processa izmel'cheniya gornyx porod v shchekovoy drobilke [Application of the discrete element method for modeling the process of rock grinding in a jaw crusher]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Priborostroenie* [News of higher educational institutions. Instrument making]. 2016. No. 9. Vol. 59. P. 780-786.

18. Burkov P.V., Burkov V.P., Timofeev V.Yu., Shadrina A.V., Saruev L.A., Burkova S.P. Matematicheskoe modelirovanie ehlektromekhanicheskikh sistem stankov dlya bureniya skvazhin s razlichnymi tipami privodov [Mathematical modeling of electromechanical systems of machine tools for drilling of wells with various types of drives]. *Gornoe oborudovanie i ehlektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics]. 2018. No. 5. P. 3-10.

#### Библиографическое описание статьи

Бурков П.В., Бурков В.П., Тимофеев В.Ю., Буркова С.П. Обоснование применения аппарата спектральных разложений для разработки моделей электромеханических систем // *Горное оборудование и электромеханика* — 2019. — № 1 (141). — С. 54-62.

#### Reference to article

Burkov P.V., Burkov V.P., Timofeev V.Yu., Burkova S.P. The rationale for the use of spectral expansion apparatus for modelling the electromechanical systems. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2019, no. 1 (141), pp. 54-62.