

УДК 621.86

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ НА МЕХАНИЗМ ПОДЪЕМА КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА

**С.Д. Иванов, А.Н. Назаров\***

МГТУ им. Н. Э. Баумана,

г. Москва, Россия

*ptm-diagnostics@yandex.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>*alexnazavr@yandex.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Выявлена проблема существующих регистраторов параметров работы крана в направлении определения интенсивности работы механизмов. Определена потребность в увеличении числа информационных источников. Предложено применение текущих параметров электродвигателя в качестве источника первичной информации.

**Материалы и методы.** Представлены характеристики экспериментальной установки. Оценка достоверности информационных источников проводилась на механизме подъема. Приведены формулы определения ошибки вычисления параметров тока статора и активной мощности и определения коэффициента пропорциональности нагрузки на привод и информационного параметра.

**Результаты.** Представлены таблицы и графики вычисленной нагрузки на механизм по току статора и активной мощности во всем диапазоне рабочих нагрузок. Исследована зависимость точности определения нагрузки от изменения напряжения питающей сети.

**Выводы.** В качестве информационного источника о нагрузке на механизм подъема крана рекомендовано применять активную мощность привода. Данный параметр показал большую по сравнению с током статора устойчивость к изменениям напряжения. Удалось достичь точности определения нагрузки 2,6% при требовании 3%.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** механизм крана, нагрузка на механизм, информация о нагрузке на механизм, кран мостового типа, механизм подъема, активная мощность привода

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы статьи выражают свою благодарность сотрудникам кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и коллективу разработчиков приборов безопасности ЗАО «ИТЦ «КРОС» за их помощь, рекомендации, ценные замечания и критику.

**Статья поступила в редакцию 10.12.2021; одобрена после рецензирования 20.01.2022; принята к публикации 28.02.2022.**

**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:** Иванов С.Д. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа / С.Д. Иванов, А.Н. Назаров // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 36-47. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-19-1-36-47>

© Иванов С.Д., Назаров А.Н., 2022

Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>

Original article

## DRIVE ELECTRICAL PARAMETERS APPLICABILITY EVALUATION TO DETERMINE LOADS ON BRIDGE CRANE LIFTING MECHANISM

**Sergey D. Ivanov, Alexander N. Nazarov\***

Bauman Moscow State Technical University,

Moscow, Russia

[ptm-diagnostics@yandex.ru](mailto:ptm-diagnostics@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>

[alexnazavr@yandex.ru](mailto:alexnazavr@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of existing recorders of crane operation parameters in the direction of determining the intensity of work of mechanisms is revealed. The necessity of increasing the number of information sources is determined. Application of current parameters of the electric motor as a source of primary information is suggested.

**Materials and methods.** The characteristics of the experimental setup are presented. The validity of information sources has been evaluated on the lifting mechanism. Formulas for determining the error of calculating the stator current and active power parameters and for determining the coefficient of proportionality of the load on the drive and the information parameter are given.

**Results.** Tables and graphs of calculated mechanism load in terms of stator current and active power over the whole range of operating loads are presented. The dependence of accuracy of load determination on changes of supply mains voltage has been investigated.

**Conclusions.** As information source of the load on the crane hoisting mechanism it is recommended to apply an active drive power. The given parameter has shown the big stability to voltage changes in comparison with a current of stator. It was possible to reach accuracy of definition of a load of 2,6 % at requirement of 3 %.

**KEYWORDS:** crane mechanism, mechanism load, mechanism load information, bridge crane, hoisting mechanism, active drive power

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The authors of the article express their gratitude to the staff of the Lifting and Transport Systems Department of Bauman Moscow State Technical University and to the team of developers of safety devices ZAO CROS ITTS for their help, recommendations, valuable remarks and critics.

**The article was submitted 10.12.2021; approved after reviewing 20.01.2022; accepted for publication 28.02.2022.**

**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:* 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>

© Ivanov S.D., Nazarov A.N., 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно принципам обеспечения безопасности на опасных производственных объектах, на которых эксплуатируются подъемные сооружения, необходимо выполнять соответствие грузовых характеристик и характеристик интенсивности работы, приведенных в паспорте и руководстве по эксплуатации, технологическому процессу (п. 9)<sup>1</sup>. Под характеристиками интенсивности понимают режимы работы, нагружения и использования механизмов и крана в целом [1, 2, 3]. На сегодняшний день единственным средством объективного контроля интенсивности использования грузоподъемных машин (ГПМ) являются приборы регистраторы параметров (РП) [4, 5, 6, 7, 8]. К преимуществам РП относятся получение объективной информации о работе крана, хранение информации о каждом рабочем цикле за всё время эксплуатации ГПМ, автоматическая обработка информации с предоставлением расчетных характеристик (режима работы механизмов, крана в целом, остаточного ресурса) [9, 10].

Помимо указанных преимуществ РП обладают рядом недостатков. На данный момент производители РП не подтверждают соответствия своей продукции ГОСТ 33713–2015<sup>2</sup>. Данное несоответствие РП ГОСТу объясняется не только низким качеством регистрируемой информации (для ОГШ-2<sup>3</sup> экспериментально выявлены пропуски циклов нагружения, недостаточная точность определения исходных данных и расчетных параметров)<sup>4</sup>, но и отсутствием у большинства производителей функции определения режимов работы механизмов передвижения, вместо которой РП фиксируют только наработку механизма в мото-часах. Из опыта работы с ЗАО «ИТЦ «КРОС» известен метод определения нагрузки на механизмы передвижения по массе перемещаемого груза. Недопустимость такого подхода под-

тверждается методикой расчета механизмов передвижения крана. Согласно [11, 12, 13, 14] к факторам, влияющим на нагрузку на механизм передвижения, относятся масса крана и груза, трение реборд колес о головки рельсов, уклон подкранового пути, ветровая нагрузка, динамические нагрузки разгона и торможения, раскачивание груза. Очевидно, что значение, полученное на основе единственного косвенного параметра (массы перемещаемого груза), будет далеко от реально действующей нагрузки на механизм передвижения. Таким образом, в целях соответствия существующих РП ФНП в пункте определения параметров интенсивности работы механизмов выявлена потребность в расширении информационной наполненности РП за счет внедрения новых источников информации.

Согласно ГОСТ 34017–2016<sup>5</sup> значение нагрузки на механизм определяется для конечного звена кинематической цепи (канатный барабан, ходовое колесо) с учетом всех факторов, включая процессы неустановившегося движения. В качестве значения нагрузки могут использоваться нагрузки на других элементах кинематической цепи (сила натяжения тяговых канатов, момент на тихоходном валу и др.). Это обусловлено тем, что нагрузку в любом элементе кинематической цепи можно привести к конечному звену через передаточные числа и коэффициенты полезного действия, значения которых в процессе эксплуатации изменяются незначительно.

Существует две группы способов получения информации о нагрузке на механизм: определение силомоментных характеристик в механической части привода [15, 16, 17] и определение нагрузки по текущим параметрам электродвигателя [18, 19]. Преимуществом первого способа является близость датчика нагрузки к конечному звену кинематической цепи и, соответственно, меньшая восприим-

<sup>1</sup> Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 N 461 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_373321/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373321/) (дата обращения: 28.11.2021).

<sup>2</sup> ГОСТ 33713–2015 Краны грузоподъемные. Регистраторы параметров работы. М.: Стандартинформ, 2016.

<sup>3</sup> Руководство по эксплуатации ОГШ-2.7...10.00.00.00 РЭ URL: <http://itc-kros.ru>

<sup>4</sup> Иванова Н. Ю., Иванов С. Д. Формирование информационной базы для уточнения расчета остаточного ресурса и улучшения методики планирования ремонтов подъемно-транспортного оборудования с использованием приборов безопасности – регистраторов параметров (на примере кранов) // материалы Всероссийской научно-практической конференции. Сборник докладов в области экономики и менеджмента, а также производственных технологий, информационных технологий и технологического менеджмента. М.: Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». 2019. С. 236–241.

<sup>5</sup> ГОСТ 34017–2016 Краны грузоподъемные. Классификация режимов работы. М.: Стандартинформ, 2018.

Таблица 1  
Основные параметры экспериментальной установки

Table 1  
Basic parameters of the pilot installation

Кран	Грузоподъемность	Высота подъема	Двигатель механизма подъема	Мощность двигателя подъема	Номинальная частота вращения	Груз
КМГ-201	2 т	8 м	МТКН -112-6	5 кВт	915 об/мин	10 x 0,2 т

чивость к изменению КПД элементов привода в процессе эксплуатации. Однако такой метод требует встройки датчиков в механическую часть привода, что часто приводит к значительным изменениям в конструкции, определяющим высокую стоимость и трудоемкость изготовления и монтажа узлов встройки.

Второй способ лишен данного недостатка, и для приводов с незначительно изменяющимся КПД механизма в процессе эксплуатации является менее затратной альтернативой силовомоментных датчиков. В литературе известны примеры применения параметров электродвигателя, таких как ток статора и ротора, скорость вращения вала двигателя, активная мощность<sup>6</sup>, с целью защиты механизма подъема от перегрузки [20].

В силу значительного отличия задач ограничения грузоподъемности и определения нагрузки на механизмы требования к первичной информации отличаются. Таким образом, в данной работе поставлена цель – определить применимость в качестве источников первичной информации текущие значения параметров электродвигателя для задачи определения реальной нагрузки, действующей на крановый механизм.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На данном этапе исследования изучается применимость текущих электрических параметров электродвигателя для определения нагрузки на механизм подъема, а его результаты позволят перенести методику определения нагрузки на механизмы передвижения тележки и крана. В распоряжении авторов отсутствуют источники информации о нагрузке на механизм передвижения, альтернативных

исследуемому, что обуславливает отработку методики на механизме подъема, для которого существуют информационные источники, не связанные с исследуемым. Оснащенность лаборатории позволила произвести сопоставление значений нагрузок, полученных с помощью текущих параметров электродвигателя, массам поднимаемых грузов. Применимость такого подхода обоснована тем, что нагрузка на механизм подъема и масса поднимаемого груза линейно и прямо пропорционально связаны. В качестве экспериментальной установки использован двухбалочный мостовой кран КМГ-201, установленный в лаборатории кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана [21]. Система управления приводами крана – релейно-контакторная. Механизм подъема приводится в движение электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Основные параметры экспериментальной установки приведены в таблице 1.

В силу линейной зависимости нагрузки на механизм подъема и массы поднимаемого груза возможно построить нормировочную характеристику по двум подъемам грузов различной массы. Далее производят подъем грузов других масс и оценивают отклонение вычисленных нагрузок от соответствующих значений на нормировочной характеристике. Для этого был использован наборный груз общей массой 2 т (10 x 0,2 т).

Определение электрических параметров электродвигателя механизма подъема производилось с помощью трехфазного электрического счетчика SPM 93. Измеряемые им характеристики, диапазон и точность измерения представлены в таблице 2. Счетчик устанавливается последовательно в силовую цепь питания соответствующего двигателя.

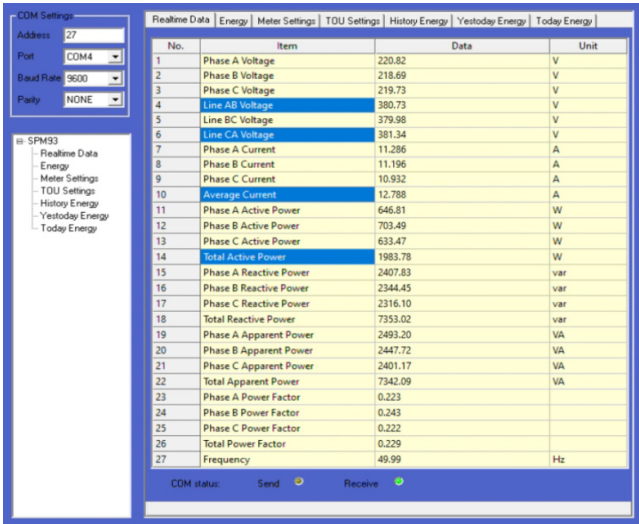
<sup>6</sup> Орлов Д. Ю., Орлов Ю. А., Однокопылов Г. И., Дементьев Ю. Н. Способ определения статического момента асинхронного двигателя для ограничения грузоподъемности крана мостового типа // Материалы Международной научно-технической конференции. Министерство образования Российской Федерации; Ивановский государственный энергетический университет; Академия технологических наук Российской Федерации; Верхне-Волжское отделение АТН РФ. 2003. 96 с.

Таблица 2  
Значимые параметры трехфазного электрического счетчика SPM 93

Table 1  
Significant parameters of SPM 93 three-phase electrical counter

Параметр	Диапазон	Точность	Разрешение
Напряжение	184...276 В	0,2%	0,01 В
Ток	0...63 А	0,2%	0,001 А
Частота	47...65	0,2%	0,01 Гц
Активная мощность	0...24 кВт	0,5%	0,1 Вт
Реактивная мощность	0...24 квар	1%	0,1 вар
Коэффициент мощности	-1...+1	0,5%	0,001
Полная мощность	0...24 кВт	0,5%	0,1 ВА
Интерфейс связи		RS485	
Обновление информации		1 с	

На рисунке 1 представлена форма получаемых электрическим счетчиком SPM 93 данных и его общий вид.



а



б

Рисунок 1 – а – вид данных в программном обеспечении PILOT SPM93 Free Configuration & Monitoring Software; б – счетчик электроэнергии SPM93. Составлено автором

Figure 1 – а – Data type in PILOT SPM93 Free Configuration & Monitoring Software; б – SPM93 Power Meter. Compiled by the author

В экспериментах оценивалась применимость следующих информационных параметров электродвигателя: ток статора, активная мощность. Полученные графики сопоставлялись с изменением напряжения перед подъемом с целью определения их устойчивости к изменению параметров питающей сети. В течение всего времени проведения эксперимента амплитуда колебаний частоты питающей

сети не превышала 0,1% от номинального значения, поэтому влияние отклонения данного параметра на точность определения нагрузки не учитывали.

Среднее значение нагрузки, определяемое по динамическому процессу установившегося движения механизма подъема, вычислялось по формуле (1):



$$x = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n}. \quad (1)$$

Продолжительность динамического процесса составляла 10 с. Таким образом, расчет средних значений исследуемых параметров с учетом периода обновления информации (см. таблицу 2) проводился по 10 измерениям.

Ошибка определения среднего в экспериментах с учетом точности счетчика SPM93 определялась по формуле (2) [22]:

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}\right)^2 + \Delta_{\text{сч}}^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение выборки;

$n$  – число измерений;

$\Delta_{\text{сч}}$  – ошибка определения параметра счетчиком.

Коэффициент пропорциональности активной мощности (тока статора) нагрузке на механизм определяли по формуле (3):

$$k = \frac{\Delta A(\Delta I)}{\Delta m}, \quad (3)$$

где  $\Delta A(\Delta I)$  – приращение активной мощности (тока статора), соответствующее приращению  $\Delta m$  массы поднимаемого груза.

Определение массы поднимаемых грузов  $m_i$  на основе изучаемых информационных параметров производилось по формуле (4):

$$m_i = m_0 + \frac{A_i(I_i) - A_0(I_0)}{k}, \quad (4)$$

где  $m_0$  – масса известного груза;

$A_i(I_i)$  – значение активной мощности (тока статора) при подъеме груза массой  $m_i$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

По записанным с помощью SPM 93 электрическим характеристикам посчитаны средние значения тока статора и активной мощности (1) при подъеме грузов соответствующих масс  $m_{\text{гр}}$  (таблица 3). Знаком «н» обозначены точки, используемые для построения нормировочной характеристики, и ошибка определения нагрузки в них не определялась. По активной мощности и току статора по (4) рассчитаны массы поднимаемых грузов  $m_{\text{выч}}$ .

Далее по двум точкам (0,2 т и 1,8 т) была построена нормировочная характеристика соответствия текущего параметра электродвигателя массе поднимаемого груза. К точкам, по которым строится нормировочная характеристика, предъявлялись два требования: точки должны соответствовать подъемам грузов с наибольшей разностью масс; изменение напряжения питающей сети в этих точках должно оказывать наименьшее воздействие на измерение (близость напряжения к медианному значению за всё время проведения эксперимента).

По (2) вычислены максимальные для серии экспериментов ошибки определения параметров тока статора и активной мощности, полученные при массе груза 0,8 т (таблица 4).

Таблица 3  
Ошибка определения массы груза по току статора и активной мощности

Table 3  
Error in determination of load mass by stator current and active power

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{\text{перед}}, \text{ В}$	380,5	379	380	381,1	<b>372,4</b>	379,7	379,9	380,6	380,6	379,5	<b>372</b>
	по току статора										
$m_{\text{гр}}, \text{ кг}$	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$m_{\text{выч}}, \text{ кг}$	430	200	368	542	-41	695	1014	1241	1530	1800	1534
$\Delta, \%$	-	н	8,1	9,7	<b>105</b>	30,5	15,5	11,33	4,4	н	<b>23,3</b>
	по активной мощности										
$m_{\text{гр}}, \text{ кг}$	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$m_{\text{выч}}, \text{ кг}$	3	200	393	592	739	996	1214	1423	1605	1800	1940
$\Delta, \%$	-	н	1,7	1,4	<b>7,6</b>	0,4	1,2	1,6	0,4	н	<b>3</b>

Таблица 4  
Максимальная ошибка определения тока статора и активной мощности

Параметр	$\sigma$	$n$	$\Delta_{сч}$	$\Delta$
Ток статора	0,034 А	10	0,02 А; (0,2%)	0,024 А (0,24%)
Активная мощность	25 Вт	10	20 Вт; (0,5%)	32 Вт (0,8%)

Таблица 5  
Ошибка определения нагрузки в зависимости от величины колебания напряжения

	Ток статора	Активная мощность
	$\Delta U = 1,1 \text{ В}$	
$\Delta_{max}, \%$	30,5	1,7
$\Delta_{\varphi}, \%$	13,3	1,2
	$\Delta U = 9,1 \text{ В}$	
$\Delta_{max}, \%$	105	7,6
$\Delta_{\varphi}, \%$	42,8	5,3

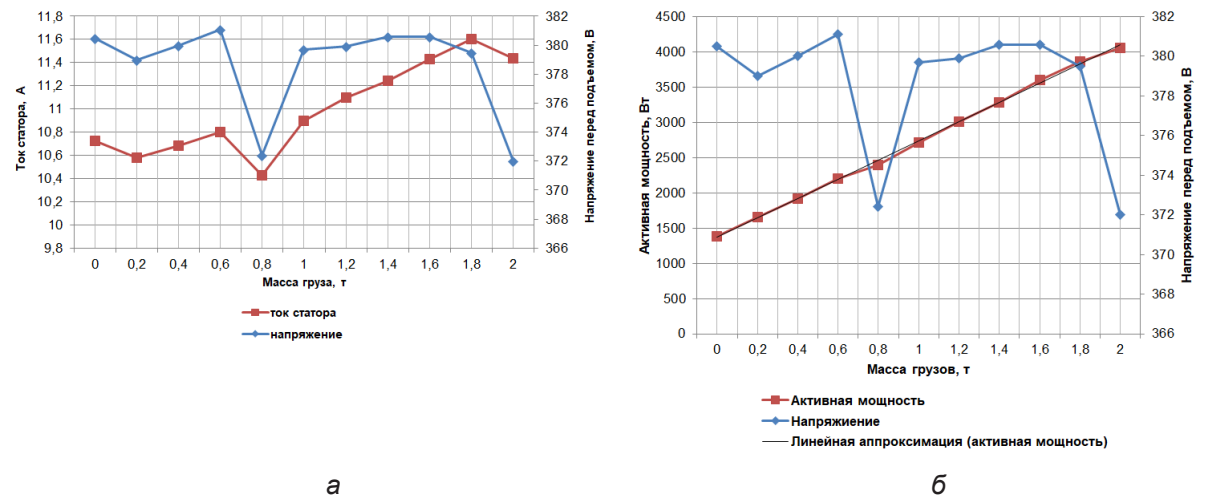
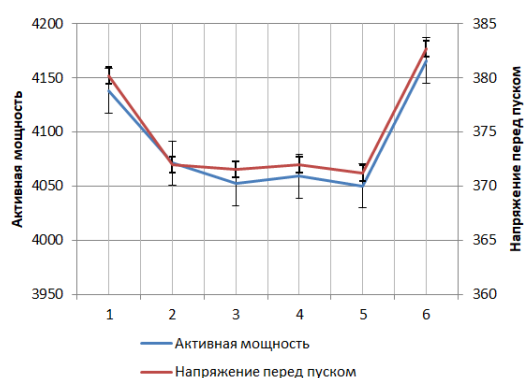
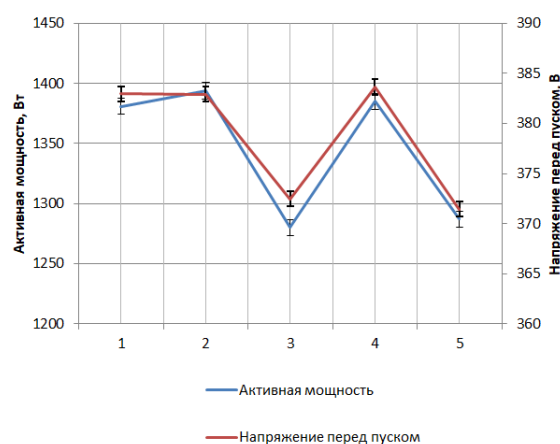


Рисунок 2 – а – график зависимости тока статора от массы поднимаемого груза (с напряжением питающей сети перед началом подъема); б – график зависимости активной мощности от массы поднимаемого груза (с напряжением питающей сети перед началом подъема).  
Составлено автором

Figure 2 – а – a graph of the dependency of the stator current on the mass of the cargo to be lifted (with the voltage of the supply network before the start of the lift); б – a graph of the dependency of the active power on the mass of the cargo to be lifted (with the voltage of the supply network before the start of the lift).  
Compiled by the author



а



б

Рисунок 3 – Активная мощность (с ошибкой определения активной мощности и напряжения) при изменении напряжения питающей сети: а – при  $a_t = 2$  т; б) при  $a_t = 0$  т. Составлено автором

Figure 3 – Active power (error in determination of active power and voltage) at change of supply voltage: а –  $a_t = 2$  tonnes; б –  $a_t = 0$  tonnes. Compiled by the author

Ошибки определения массы груза по току статора и активной мощности в зависимости от отклонения напряжения питающей сети представлены в таблице 5. Значения тока статора и активной мощности при массах груза 0,8 т и 2 т нельзя считать промахами, так как во время данных подъемов напряжения питающей сети было значительно ниже номинального. Этот факт определяет невозможность достоверного вычисления массы груза на основе непосредственного измерения исследуемых параметров и определяет необходимость включения в состав первичной информации напряжения питающей сети.

Получены графики зависимости тока статора и активной мощности от массы поднимаемого груза (рисунок 2, а, б). На графиках также представлена информация о напряжении питающей сети перед началом подъема каждого груза.

Коэффициент пропорциональности (3) активной мощности и тока статора массе поднимаемого груза составил соответственно  $k_{a.m.} = 1,34 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$  и  $k_{т.с.} = 0,00064 \frac{\text{А}}{\text{кг}}$ .

Для определения влияния отклонения напряжения питающей сети от номинального значения на показания активной мощности дополнительно произвели по 6 подъемов без груза и с номинальным грузом (рисунок 3).

Первый способ корректировки заключался в умножении полученного с помощью актив-

ной мощности значения нагрузки на коэффициент  $c$  [23]:

$$c = \left( \frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (5)$$

где  $U$  – напряжение перед началом подъема груза,

$U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение сети.

В результате анализа графиков (см. рисунок 3) было замечено, что зависимость изменения активной мощности от отклонения напряжения имеет линейный характер, а сопоставление графиков рисунка 3, а, б показало, что одинаковое падение напряжения при подъеме различных грузов приводит к одинаковому уменьшению активной мощности (т. е. отсутствует зависимость от массы поднимаемого груза). На основе выявленных закономерностей была произведена корректировка активной мощности вторым способом, заключающимся в прибавлении к вычисленной нагрузке дополнительного слагаемого, зависящего только от изменения напряжения:

$$S = \frac{A_i(U_1)}{A_i(U_2)} \cdot (U_{\text{ном}} - U), \quad (5)$$

где  $A_i(U_j)$  – значение активной мощности, полученное при подъеме  $i$ -й нагрузки и напряжении  $U_j$ .

Результаты вычислений приведены в таблице 6.



Таблица 6  
Влияние учета изменения напряжения на ошибку определения активной мощности

Table 6  
Voltage change impact on active power error

	A, Вт	U, В	k	S	m, кг	m(c), кг	m(S), кг
$m_{гр} = 0 \text{ т}$							
1	1381	382,95	0,985	-29	20	0	-9
2	1394	382,92	0,985	-29	34	13	5
3	1280	372,46	1,041	75	-71	-28	-4
4	1385	383,63	0,981	-36	47	-1	-11
5	1287	371,45	1,047	86	-73	-13	13
$\Delta_{max}$					107	41 кг	22 кг
$m_{гр} = 2 \text{ т}$							
1	4138	380,20	0,999	-1	2029	1998	2028
2	4071	371,97	1,044	60	1942	2053	2022
3	4052	371,55	1,046	63	1939	2048	2022
4	4050	371,20	1,048	66	1937	2051	2023
5	4166	382,68	0,986	-20	2017	1985	1993
$\Delta_{max}$					92 кг (4,6%)	68 кг (2,7%)	35 кг (1,4%)

Для проверки правильности выводов, полученных из анализа графиков рисунка 4, вторую корректировку применили к данным таблицы 3, таким образом оценили ее адекватность во всем диапазоне действующих на привод нагрузок (таблица 7).

Таблица 7  
Применение корректировки по напряжению

Table 7  
Application of voltage adjustment

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
по активной мощности											
$U_{перед}$ , В	380,5	379	380	381,1	372,4	379,7	379,9	380,6	380,6	379,5	372
$m_{гр}$ , кг	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$m_{выч}$ , кг	3	200	393	592	739	996	1214	1423	1605	1800	1940
$m(S)$ , кг	6	-	393	584,5	796	998	1215	1419	1600	-	2000
$\Delta$ , %	-	н	0	2,6	0,5	0,2	1,2	1,4	0	н	0

## ВЫВОДЫ

Для получения информации о нагрузке на крановые механизмы было предложено использовать значения текущих параметров соответствующего электродвигателя. В качестве таких параметров исследовались ток статора и активная мощность. Оба параметра показали линейную зависимость от массы поднимаемого груза. Однако даже при незначительном изменении напряжения питающей сети ( $\Delta U = 1,1 \text{ В}$ ) ошибка определения нагрузки по току статора составила 30,5%, а при изменении на  $\Delta U = 9,1 \text{ В}$  ошибка составила 105%. На

основе измерения активной мощности удалось достичь точности определения массы (при  $\Delta U = 1,1 \text{ В}$ ) 1,7%, и (при  $\Delta U = 9,1 \text{ В}$ ) 7,6%.

Кроме того, установлено, что одинаковое изменение массы поднимаемого груза приводит к изменению показаний активной мощности в 210 раз большим, чем тока статора. На основании представленных результатов сделан вывод о применимости активной мощности в качестве информационного параметра для определения нагрузки на механизм подъема в силу низкой восприимчивости к колебаниям напряжения питающей сети и большего по

сравнению с током статора коэффициентом пропорциональности нагрузке.

Для корректировки влияния изменения напряжения питающей сети были опробованы 2 метода. Первый метод учитывает массу поднимаемого груза, а значение поправочного коэффициента пропорционально квадрату изменения напряжения. Применение данного метода привело к уменьшению ошибки определения нагрузки в 1,7 раза.

На основе анализа экспериментальных зависимостей (рисунок 4) был разработан метод, не учитывающий массу поднимаемого груза. Поправочное слагаемое, прибавляемое к вычисленному на основе первичной информации об активной мощности значению нагрузки, прямо пропорционально изменению напряжения. Данный метод позволил для данных таблицы 6 снизить ошибку в 3,3 раза (см. таблицу 7). Таким образом, второй способ позволяет получить точность определения нагрузки в 2 раза выше, чем первый. Применение второго метода корректировки по напряжению во всем диапазоне нагрузок позволило снизить ошибку с 7,6% до 2,6% (в 2,9 раза).

Таким образом, с помощью измерения активной мощности с точностью первичной информации 0,5% по динамическому процессу подъема, определением средней нагрузки за цикл методом непосредственного осреднения и корректировки по напряжению питающей сети удалось достичь точности определения нагрузки на привод 2,6% во всем диапазоне нагрузок, что удовлетворяет требованию ГОСТ 33713–2015 (3%). Из этого следует, что на основе параметра активной мощности возможно разработать методику для определения нагрузки и на другие крановые механизмы – передвижения тележки и крана.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Москвичева Л. Ф., Чернякова Н. А. Исследования прочности, ресурса и надежности крановых металлоконструкций: обзор и результаты // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2020. С. 933–955.
2. Климаш В. С., Соколовский М. А. Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. С. 34–40.
3. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Печёркин А. С., Красных Б. А. Расчетно-экспериментальные подходы к анализу обеспечения ресурса и срока безопасной эксплуатации промышленных объектов // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 1. С. 7–15. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-7-15
4. Пестич С. Д. Обзор регистраторов параметров кранового оборудования при строительстве для предотвращения аварийных ситуаций // International scientific review of the problems and prospects of modern science and education. 2019. С. 16–18.
5. Воронцов Д. С. Применение данных с регистраторов параметров работы крана с целью определения ресурса работы грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы // European Science. 2015. № 3(4). С. 10–17.
6. Яценко О. В., Омельчук М. В. Оценка технического состояния крана автомобильного стрелового КС-45-717-1, эксплуатирующегося в условиях Крайнего Севера // Северный морской путь, водные и сухопутные транспортные коридоры как основа развития Сибири и Арктики в XXI веке. 2018. С. 391–399.
7. Эпов Д. А. Использование приборов и устройств безопасности на подъемных сооружениях // Вестник современных исследований. 2021. № 3–5 (41). С. 12–15.
8. Горелов В. Н. Опыт применения данных регистратора параметров при расследовании аварии башенного крана QTZ160 // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2019. № 4. С. 12–18.
9. Мокшин В. В., Якимов И. М., Кирпичников А. П., Шарнин Л. М. Разработка системы мониторинга состояния грузоподъемных механизмов // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 19. С. 75–81.
10. Алексанкин В. А., Каминский Л. С., Каминский Ф. Л., Пятницкий И. А., Федоров И. Г. Совершенствование устройств архивации и трансляции параметров работы грузоподъемных кранов // Строительство: новые технологии – новое оборудование. 2017. № 6. С. 42–49.
11. Каржавин В. В., Каменский С. В., Душанин И. В. Расчет крановых механизмов. Курсовой проект: учебное пособие // Екатеринбург: РГПДУ. 2017. 115 с. Режим доступа: <http://elar.rsvpu.ru/978-5-8050-0634-1>.
12. Шугайло Т. С. Управление движением козлового крана с грузом заданием ускорения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2020. С. 154–164.
13. Корытов М. С., Щербаков В. С., Беляков В. Е. Моделирование и исследование колебаний груза, перемещаемого грузоподъемным краном // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16, № 5 (69). С. 526–533.
14. Шимкович Д. Г. Динамические нагрузки при колебаниях груза на канате // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2012. № 4. С. 141–146.
15. Коган Б. И., Васильков С. А. Технологическое обеспечение качества узла встройки тензометрического датчика // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 4 (80). С. 46–53.
16. Каминский Л. С., Каминский Ф. Л., Пятницкий И. А., Федоров И. Г. Повышение эффективности использования приборов безопасности грузоподъемных кранов // Научная перспектива. 2016. № 1. С. 140–144.

17. Тимин Ю. Ф. Применение ограничителей грузоподъемности типа ОГШ в кранах мостового типа // Подъемно-транспортное дело. 2010. № 2 (57). С. 10–11.

18. 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, № 1. С. 122–131.

19. 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.

20. Орлов Ю. А., Дементьев Ю. Н., Однокопылов Г. И., Орлов Д. Ю., Однокопылов И. Г., Столяров Д. П. Система защиты мостового крана на основе мониторинга параметров электропривода механизма подъема // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 4. С. 119–124.

21. Рощин В. А., Иванов С. Д., Михальчик Н. Л. Разработка и экспериментальная проверка алгоритма самонастройки ограничителя нагрузки ОГШ для кранов мостового типа // Вестник СибАДИ. 2018. № 4. С. 514–524. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-4-514-524>

22. Иванов С. Д., Назаров А. Н., Михальчик Н. Л. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1926. 7 c. doi:10.1088/1742-6596/1926/1/012047

23. Попов Д. А. Исследование влияния изменения напряжения сети на потери мощности при испытании асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 145–154.

## REFERENCES

1. Moskvicheva L.F., Chernyakova N.A. Issledovaniya prochnosti, resursa i nadezhnosti kranovykh metallokonstrukcij: obzor i rezul'taty [Research on Strength, Service Life and Reliability of Crane Metal Structures: Review and Results]. *Zhurnal sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: tekhnika i texnologii*, 2020: 933-955.

2. Klimash V.S., Sokolovskij M.A. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti kompleksa podemnykh kranov [Improving the energy efficiency of the crane complex]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2020: 34-40.

3. Maxutov N.A., Gadenin M.M., Pechyorkin A.S., Krasnykh B.A. Raschetno-eksperimentalnye podpody k analizu obespecheniya resursa i sroka bezopasnoj ekspluatatsii promyshlennykh obektov [Calculation and experimental approaches to the analysis of ensuring the service life and safe operation period of industrial facilities]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2020, 1: 7-15. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-7-15

4. Pestich S.D. Obzor registratorov parametrov kranovogo oborudovaniya pri stroitelstve dlya predotvrashheniya avariynykh situacij [Review of crane equipment parameter recorders in construction to prevent accidents]. *International scientific review of the problems and prospects of modern science and education*, 2019: 16-18.

5. Voronczov D.S. Primenenie dannyp s registratorov parametrov raboty kрана s celyu opredeleniya resursa raboty gruzopodemnykh kranov s istekshim srokom sluzhby [Application of data from crane operating parameter recorders to determine the service life of cranes with expired service life]. *European Science*, 2015, 3(4): 10-17.

6. Yacenko O.V., Omel'chuk M.V. Ocenka tehnikeskogo sostoyaniya kрана avtomobil'nogo strelovogo KS-45-717-1, ekspluatiruyushhegosya v usloviyakh krajnego severa [Assessment of the technical condition of the automobile jib crane KS-45-717-1, operated in conditions of the far north]. *Severnyj morskoy put', vodnye i suhoputnye transportnye koridory kak osnova razvitiya sibiri i arktiki v XXI veke*, 2018: 391-399.

7. Epov D.A. Ispol'zovanie priborov i ustroystv bezopasnosti na podemnykh sooruzheniyah [Use of safety devices and appliances on lifting structures]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*, 2021, 3-5(41): 12-15.

8. Gorelov V.N. Opyt primeneniya dannyh registratora parametrov pri rassledovanii avarii bashennogo kрана QTZ160 [Experience of using parameter recorder data in the investigation of the QTZ160 tower crane accident]. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo*, 2019, 4: 12-18.

9. Mokshin V.V., Yakimov I.M., Kirpichnikov A.P., Sharnin L.M. Razrabotka sistemy monitoringa sostoyaniya gruzopodemnykh mexanizmov [Development of a system for monitoring the condition of lifting devices]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, .19: 75-81

10. Aleksankin V.A., Kaminskij L.S., Kaminskij F.L., Pyatniczkij I.A., Fedorov I.G. Sovershenstvovanie ustroystv arxivatsii i translyatsii parametrov raboty gruzopodemnykh kranov [Improvement of archiving and broadcasting devices for crane operation parameters]. *Stroitel'stvo: novye texnologii - novoe oborudovanie*, 2017, no. 6, pp. 42-49.

11. Karzhavin V.V., Kamenskij S.V., Dushanin I.V. Raschet kranovykh mexanizmov. Kursovoj proekt. Uchebnoe posobie [Calculation of crane mechanisms. Course project. Manual]. *Ekaterinburg: RGPU*, 2017, 115. URL: <http://elar.rsvpu.ru/978-5-8050-0634-1>.

12. Shugajlo T.S. Upravlenie dvizheniem kozlovogo kрана s gruzom zadaniem uskoreniya [Gantry crane motion control with acceleration setting]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mexanika. Astronomiya*, 2020, pp. 154-164.

13. Korytov M.S., Shherbakov V.S., Belyakov V.E. Modelirovaniye i issledovaniye kolebanij gruzа, peremeshhaemogo gruzopodemnym kranom [Modeling and study of oscillations of cargo transported by a

crane]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, 5(69): 526-533.

14. Shimkovich D.G. Dinamicheskie nagruzki pri kolebaniyax gruzha na kanate [Dynamic loads during oscillation of the load on the rope]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa Lesnoj vestnik*, 2012, 4: 141-146.

15. Kogan B.I., Vasil'kov S.A. Teknologicheskoe obespechenie kachestva uzla vstrojki tenzometricheskogo datchika [Technological quality assurance of the strain gauge insertion unit]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, 4(80): 46-53.

16. Kaminskij L.S., Kaminskij F.L., Pyatniczkij I.A., Fedorov I.G. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya priborov bezopasnosti gruzopodnyomnykh kranov [Increasing the efficiency of crane safety devices]. *Nauchnaya perspektiva*, 2016, 1: 140-144.

17. Timin Yu.F. Primenenie ogranichitelej gruzopodemnosti tipa ogsh v kranax mostovogo tipa [Use of ogsh-type load-limiters in overhead cranes]. *Podemno-transportnoe delo*, 2010, 2(57): 10-11

18. Semykina I.Yu., Kipervasser M.V., Gerasimuk A.V. Issledovanie tokov privoda podema mostovykh kranov metallurgicheskix predpriyatij dlya rannego diagnostirovaniya prevysheniya massy gruzha [Study of currents of the lifting drive of overhead cranes of metallurgical enterprises for early diagnosis of excess weight]. *Zapiski Gornogo instituta*, 1: 122-131.

19. Orlov Yu.A., Stolyarov D.P., Burkov V.P. Sovershenstvovanie sistemy zashhity i kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya elektromekhanicheskoy sistemy krana mostovogo tipa [Improvement of the system of protection and control of the technical condition of the electromechanical system of the bridge-type crane]. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 2011, 2: 363-368.

20. Orlov Yu.A., Dementev Yu.N., Odnokopylov G.I., Orlov D.Yu., Odnokopylov I.G., Stolyarov D.P. Sistema zashhity mostovogo krana na osnove monitoringa parametrov elektroprivoda mehanizma podyoma [Overhead crane protection system based on monitoring parameters of the electric drive of the hoisting mechanism]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2008, 4: 119-124

21. Roshhin V.A., Ivanov S.D., Mixal'chik N.L. Razrabotka i eksperimentalnaya proverka algoritma samonastroyki ogranichitelya nagruzki OGSh dlya kranov mostovogo tipa [Development and experimental verification of the self-tuning algorithm for the load limiter for overhead cranes]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* 2018, 4: 514-524.

22. Ivanov S.D., Nazarov A.N., Mixal'chik N.L. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1926: 7. doi:10.1088/1742-6596/1926/1/012047.

23. Popov D.A. Issledovanie vliyaniya izmeneniya napryazheniya seti na poteri moshhnosti pri ispytaniy asinxronnykh dvigatelej metodom vzaimnoy nagruzki [Study of the effect of changes in mains voltage on power losses when testing asynchronous motors by the method of mutual load]. *Vestnik Chuvashskogo*, 2020, 1: 145-154.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Иванов С. Д. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач.

Назаров А. Н. Обзор литературы, проведение экспериментов, анализ результатов.

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

Sergey D. Ivanov. Stating the direction of the study, formulating goals and objectives.

Alexander N. Nazarov. Literature review, experimentation, analysis of results.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, доц.

Назаров Александр Николаевич – аспирант.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey D. Ivanov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Hoisting and Transport Systems Department.

Alexander N. Nazarov – Postgraduate student of the Hoisting and Transport Systems Department.