

УДК 621.311.1

EDN AGEMCY

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПОГРУЗОЧНОГО КРАНА МОРСКОГО ПОРТА

Д.Ю. Платонов

ORCID: 0000-0002-5422-9543 e-mail: brounco@yandex.ru
Самарский Государственный технический университет
Самара, Россия

Е.А. Кротков

ORCID: 0009-0004-2937-9154 e-mail: krotkov.e.a@gmail.com
Самарский Государственный технический университет
Самара, Россия

В.П. Степанов

ORCID: 0009-0005-9354-8677 aees@samgtu.ru
Самарский Государственный технический университет
Самара, Россия

Развитие Северного морского пути требует создания новых и реконструкции существующих морских портов. В системе электроснабжения морского порта наиболее мощным и распространенным видом электрического оборудования являются погрузочные краны грузоподъемностью от 3 до 50 тонн, характеризующиеся циклическим графиком электрической нагрузки при работе с контейнерами. Оценка расчетной электрической нагрузки портовых погрузочных кранов производится на основе индивидуального графика электрической нагрузки портового погрузочного крана при работе с контейнером массой 6 тонн. Фрагмент индивидуального графика электрической нагрузки портового погрузочного крана представляет из себя реализацию технологического процесса работы портового крана, включающего в себя четыре основных процесса: подъем контейнера, перемещение контейнера в зону погрузки, опускание контейнера, перемещение крана в рабочую область. Представленный в работе график электрической нагрузки портового погрузочного крана, в связи со сравнительно малой величиной электрической нагрузки в момент перемещения контейнера по рабочей области, можно представить в виде модели двухступенчатого графика электрической нагрузки. Показано, что при одновременной работе от 4 до 8 погрузочных кранов вероятностное распределение ординат группового графика электрической нагрузки описывается законом Грамма-Шарлье типа А. Для уточнения расчетной электрической нагрузки найдено аналитическое выражение эксцесса циклического графика электрической нагрузки погрузочного крана при их работе с контейнерным грузом.

Ключевые слова: график электрической нагрузки, погрузочный кран, расчетная электрическая нагрузка, система электроснабжения морского порта.

Для цитирования: Платонов Д.Ю., Кротков Е.А., Степанов В.П. Моделирование расчетной электрической нагрузки погрузочного крана морского порта // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 21-30. EDN AGEMCY

MODELING CALCULATED ELECTRICAL LOAD OF SEAPORT LOADING CRANE

D. Yu. Platonov

ORCID: 0000-0002-5422-9543 e-mail: brounco@yandex.ru
Samara State Technical University
Samara, Russia

E.A. Krotkov

ORCID: 0009-0004-2937-9154 e-mail: krotkov.e.a@gmail.com
Samara State Technical University
Samara, Russia

V.P. Stepanov

ORCID: 0009-0005-9354-8677 aees@samgtu.ru
Samara State Technical University
Samara, Russia

The development of the Northern Sea Route requires the creation of new and reconstruction of existing seaports. Port loading cranes with a lifting capacity from 3 to 50 ton are the most powerful and widespread type of electrical equipment in the seaport's power supply system. They are characterized by a cyclic load curve when working with containers. The estimated electrical load of loading port cranes is estimated on the basis of an individual load curve of a port loading crane when working with a container weighing 6 tons. A fragment of an individual graph of the electric load of a loading crane represents the implementation of the technological process of a port crane, which includes four main processes: lifting the container, moving the container to the loading area, lowering the container, moving the crane to the work area. The graph of the electrical load of the port crane presented in the work can be represented as a model of a two-stage electrical load graph due to comparatively small magnitude of the electrical load at the time of moving the container across the work area. It is shown that with simultaneous operation of 4 to 8 loading cranes, the probabilistic distribution of the ordinates of the group graph of the electrical load is described by the Gram-Charlier law of type A. An analytical expression of the kurtosis of the cyclic graph of the electric load of the loading crane during their operation with a container load was found to clarify the estimated electrical load.

Keywords: load curve, loading crane, calculated electrical load, seaport power supply system.

For citation: D.Yu. Platonov, E.A. Krotkov and V.P. Stepanov, "Modeling calculated electrical load of seaport loading crane", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 21-30, 2024. EDN AGEMCY

1. Введение

В связи с увеличением морских грузоперевозок через Северный морской путь требуется выполнить реконструкцию морских портов, включая обновление парка погрузочных кранов. Наиболее мощными электроприемниками (ЭП) в системе электроснабжения (СЭС) порта являются погрузочные краны, характеризующиеся циклическим графиком электрической нагрузки (ГЭН). Для выполнения погрузочно-разгрузочных операций в морских портах используется от 5 до 10 погрузочных кранов [1].

Существующие на данный момент исследования о расчетных электрических нагрузках кранов морских портов в отечественной и иностранной, посвящены в первую очередь, исследованию новых типов грузов или погрузочных кранов в рамках СЭС порта, но не направлены в сторону усовершенствования существующего принципа моделирования. В связи с этим, в качестве объекта исследования выбран сам принцип моделирования расчетной электрической нагрузки, а также возможность его применения в специализированных программных комплексах.

Цели и задачи работы: совершенствование математической модели расчетной электрической нагрузки погрузочных кранов в СЭС порта.

Схема питания погрузочных кранов в системе электроснабжения морского порта приведена на рис. 1. Погрузочные краны соединены с системой шин низкого напряжения главной понизительной подстанции порта 110/35/10(6) кВ через шкаф низковольтного комплектного устройства, а также специальные электрические колонки, совмещающие в себе функции коммутационного аппарата, счетчика электрической энергии, а также устройств защиты ЭП от перегрузок и токов коротких замыканий.

В зависимости от назначения порта погрузочные краны работают со следующими группами грузов: штучные; навалочные, наливные, лесные. В настоящее время наибольшее распространение среди штучных грузов имеют сухогрузные морские контейнеры, отвечающие требованиям ГОСТ Р 53350-2009 [2].

Работа погрузочного крана с контейнером состоит из следующих операций: подъем контейнера, его перемещение в зону погрузки, его опускание, перемещение крана в рабочую область. Фрагмент индивидуального графика электрической нагрузки погрузочного крана с номинальной мощностью 20 кВт при работе с контейнером представлен на рис. 2, где в период с 0 до 25 сек осуществляется подъем груза, в период с 25 до 60 сек осуществляется перемещение груза, в период с 60 до 85 сек опускание груза, а после 85 сек производится возврат крана в рабочую область [3,4].

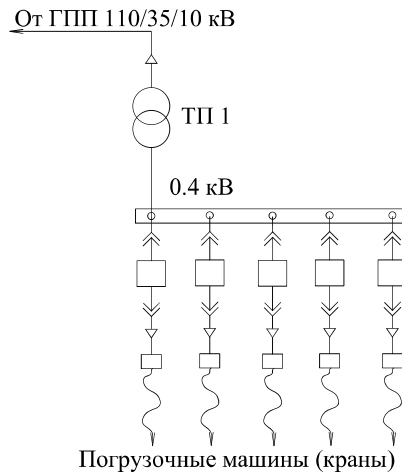


Рис. 1. Схема питания погрузочных кранов

Fig. 1. Power supply diagram of loading cranes

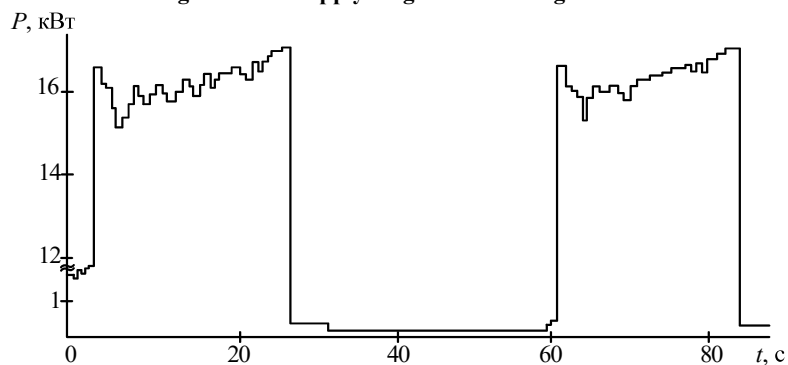


Рис. 2. Фрагмент индивидуального графика электрической нагрузки погрузочного крана при работе с контейнером

Fig. 2. Fragment of an individual load curve of a loading crane when working with a container

В соответствии с фрагментом индивидуального графика (рис. 2), а также временем включения и пауз, индивидуальный график электрической нагрузки погрузочного крана определяется как циклический [5], где время пауз и циклов меняется случайным образом.

Представим фрагмент индивидуального графика электрической нагрузки погрузочного крана моделью двухступенчатого циклического графика (рис. 3). Электрическая нагрузка погрузочного крана во время работы

с контейнером представляет собой дискретную случайную величину (СВ), которая принимает значение P_n с вероятностью k_3 при подъеме контейнера, и значение $P = 0$ с вероятностью k_0 при перемещении погрузочного крана.

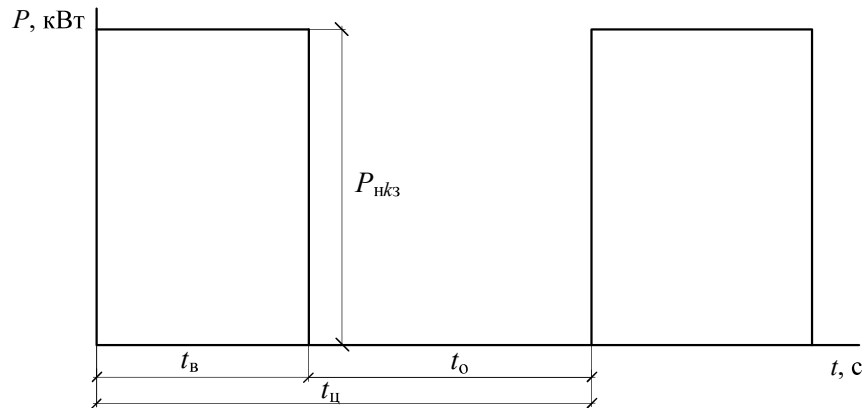


Рис. 3. Модель индивидуального графика электрической нагрузки погрузочного крана при работе с контейнером

Fig. 3. Model of individual load curve of loading crane when working with container

Потребление активной мощности в период подъема контейнера P_B :

$$P_B = P_n \cdot k_3, \quad (1)$$

где: P_n — номинальная мощность погрузочного крана; k_3 — коэффициент загрузки.

Коэффициент включения k_B :

$$k_B = \frac{k_{II}}{k_3}, \quad (2)$$

где k_{II} — коэффициент использования.

Коэффициент отключения k_0 :

$$k_0 = 1 - k_B, \quad (3)$$

II. Основная часть

Из теории электрических нагрузок известно, что аналитические методы расчета характеристики групповых ГЭН базируется на следующей аксиоме [5, 6]:

- нормальный закон распределения вероятностей ординат групповых ГЭН;
- независимость работы отдельных ЭП в группе;
- стационарность процесса потребления электроэнергии группой ЭП.

При числе ЭП $n \geq 10$, ГЭН описываются нормальным законом распределения вероятностей ординат графиков [5, 6], а при числе ЭП в группе от 4 до 8 описывается законом распределения Грамма-Шарлье типа А [7-9]:

$$f_A(x) = f(x) - \frac{A}{6} f^{(3)}(x) + \frac{E}{24} f^{(4)}(x), \quad (4)$$

где $f(x)$ – плотность распределения стандартного нормального закона;

$A = \frac{\mu_3}{\mu_2 \cdot \sqrt{\mu_2}} = \frac{\mu_3}{DP \cdot \sqrt{DP}}$ – коэффициент асимметрии, зависящий от второго

μ_2 и третьего μ_3 моментов; $E = \frac{\mu_4}{DP^2} - 3$ – коэффициент эксцесса, зависящий от четвертого μ_4 момента; DP – дисперсия графика электрической нагрузки.

Таким образом, использование в расчетах характеристик графиков электрических нагрузок, описываемых законом Грамма-Шарлье типа А, требует нахождения третьего и четвертого момента.

Аналитическое выражение для определения третьего момента закона распределения вероятностей ординат суммарных ГЭН получено в [7]. Найдем аналитическое выражение для четвертого момента μ_4 закона распределения вероятностей ординат ГЭН. В основу вывода выражения для вычисления четвертого момента μ_4 положена модель работы ЭП в режиме «включено-выключено». Режим «включено» характеризуется за время включения t_v потреблением постоянной активной мощности (1) и коэффициентом включения $k_v = t_v / t_{ц}$ [5], где $t_{ц}$ – время цикла. Режим «выключено» за время отключения t_o характеризуется $k_o = t_o / t_{ц} = 1 - t_v / t_{ц}$.

Из (2) $k_n = k_v \cdot k_3$ соответствует значению нагрузки $P_n \cdot k_3$, а значению нагрузки 0 – коэффициент $k_o = 1 - k_n / k_3$. Таким образом, для модельного индивидуального графика электрической нагрузки ЭП ряд распределения значений электрической нагрузки запишется в виде, представленном в табл. 1. Математическое ожидание и дисперсия СВ электрической нагрузки для графика, изображенного на рис. 3, соответственно равны [10]:

$$\begin{aligned} M(P) &= P_c = P_n \cdot k_n; \\ DP &= P_n^2 \cdot k_n (k_3 - k_n), \end{aligned} \quad (5)$$

где P_c – величина средней нагрузки.

Таблица 1.
Ряд распределения значений электрической нагрузки модельного графика для одного погрузочного крана

Table 1.
A series of distribution of electric load values of the model schedule for one loading crane

Значения электрической нагрузки P_i , кВт	$P_n \cdot k_3$	0
Вероятность значения электрической нагрузки e_i	k_n / k_3	$1 - k_n / k_3$

Подставляя значение дискретной СВ электрической нагрузки и соответствующие им вероятности из табл. 1 в формулу четвертого момента [10], получим:

$$k_n = k_3 k_n = \mu_4 = \sum_{i=1}^n P_i^4 \cdot k_{ni} (k_3 - k_{ni}) (k_3^2 + 3k_{ni}^2 - 3k_{ni} k_3). \quad (6)$$

Выражение в круглых скобках представим в виде:

$$k_3^2 - 3k_{ni} k_3 + 2k_{ni}^2 + k_{ni}^2, \quad (7)$$

в котором первые три члена представляют собой квадратный трехчлен. Корни квадратного уравнения равны:

$$k_3 = \frac{3k_{ni} \pm \sqrt{9k_{ni}^2 - 8k_{ni}^2}}{2} = \frac{3k_{ni} \pm k_{ni}}{2}, \quad (8)$$

Из (8) следует, что $k_3 = 2k_{ni}$ и $k_3 = k_{ni}$. Таким образом, квадратный трехчлен, как слагаемое в (7), запишется в следующем виде:

$$k_3^2 - 3k_{ni} k_3 + 2k_{ni}^2 = (k_3 - 2k_{ni})(k_3 - k_{ni}), \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), а (7) в (6), получим выражение для четвертого момента закона распределения ординат индивидуального графика нагрузки одного ЭП:

$$\mu_4 = P_{ni}^4 \cdot k_{ni} (k_3 - k_{ni}) [(k_3 - 2k_{ni})(k_3 - k_{ni}) + k_{ni}^2]. \quad (10)$$

В следующей работе авторы планируют провести анализ возможности использования (10) для более сложных видов циклических графиков электрической нагрузки погрузочного крана.

III. Заключение

В результате проведенного исследования получено аналитическое выражение эксцесса циклического графика электрической нагрузки погрузочного крана морского порта при работе с контейнерами, которое может быть использовано для моделирования СЭС морского порта в специализированных программных комплексах.

Дальнейшее исследование будет посвящено оценке вероятностных характеристик группового графика электрической нагрузки при моделировании графиков электрической нагрузки погрузочного крана с учетом рекуперации.

© Платонов Д.Ю., 2024

© Кротков Е.А., 2024

© Степанов В.П., 2024

Поступила в редакцию 27.04.2024

Принята к публикации 16.07.2024

Received 27.04.2024

Accepted 16.07.2024

Библиографический список

- [1] Толочкова О.М., Саушев А.В., Шошмин В.А. Методы расчета электрических нагрузок для оптимизации процесса электроснабжения морских и речных портов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2019. Т. 2. С. 57-60.
- [2] Официальная статистическая информация // Росморречфлот. [Электронный ресурс]. URL: https://morflot.gov.ru/glavnaya/otkryitoe_agentstvo/of_stat_info/ (дата обращения 01.02.2024).
- [3] Alasali F., Luque A., Mayer R., Holderbaum W. A Comparative Study of Energy Storage Systems and Active Front Ends for Networks of Two Electrified RTG Cranes // Energies. 2019. № 12 (9). DOI: 10.3390/en12091771
- [4] Harrison I., Pietrosanti S., Luque A., Mayer R., Holderbaum W. Recording and analysing measurements from an RTG crane // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2018. V. 125. P. 284-293. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.04.089
- [5] Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
- [6] Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. Киев: Науч. думка, 1984. – 271 с.
- [7] Жежеленко И.В., Кротков Е.А., Степанов В.П. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 217 с.

- [8] Гудков А.В. Расчет электрических нагрузок на низших ступенях иерархии систем электроснабжения машиностроительных предприятий: автореф. дис. канд. техн. наук, СамГТУ, Самара, 2009. – 20 с.
- [9] Идиатулин Р.Ф. Совершенствование иерархически-структурного метода расчета электрических нагрузок на машиностроительных предприятиях: автореф. дис. канд. техн. наук, СамГТУ, Самара, 2012. – 20 с.
- [10] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.

References

- [1] O.M. Toloknova, A.V. Saushev and V.A. Shoshmin, “Metody rascheta elektricheskikh nagruzok dlya optimizacii processa elektrosnabzheniya morskikh i rechnyh portov [Methods of calculating electrical loads for optimizing the process of power supply to sea and river ports]”, *Transactions of the international symposium on reliability and quality*, vol. 2, pp. 57-60, 2019 (in Russian).
- [2] Oficial'naya statisticheskaya informaciya [Official statistical information]. [Online]. Available at: https://morflot.gov.ru/glavnaya/otkryitoe_agentstvo/of_stat_info/ [Accessed: Feb. 1, 2024] (in Russian).
- [3] F. Alasali, A. Luque, R. Mayer and W. Holderbaum, “A Comparative Study of Energy Storage Systems and Active Front Ends for Networks of Two Electrified RTG Cranes”, *Energies*, vol. 12, no. 9, 2019. DOI: 10.3390/en12091771
- [4] I. Harrison, S. Pietrosanti, A. Luque, R. Mayer and W. Holderbaum, “Recording and analysing measurements from an RTG crane”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 125, pp. 284-293, Sep. 2018. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.04.089
- [5] A.K. Shidlovsky, G.Ya. Vagin and E.G. Kurenny, *Raschety elektricheskikh nagruzok sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij [Calculations of electrical loads of power supply systems of industrial enterprises]*. Moscow: Energoatomizdat, 1992 (in Russian).
- [6] A.K. Shidlovsky and E.G. Kurenny, *Vvedenie v statisticheskuyu dinamiku sistem elektrosnabzheniya [Introduction to the statistical dynamics of power supply systems]*. Kiev: Nauch. dumka, 1984 (in Russian).
- [7] I.V. Zhezhelenko, E.A. Krotkov and V.P. Stepanov, *Metody veroyatnogo modelirovaniya v raschyotah harakteristik elektricheskikh nagruzok potrebitelej [Methods of probabilistic modeling in calculations of characteristics of electrical loads of consumers]*. M.: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).
- [8] A.V. Gudkov, “*Raschet elektricheskikh nagruzok na nizshih stupenyah ierarhii sistem elektrosnabzheniya mashinostroitel'nykh predpriyatij [Calculation of electrical loads at the lowest levels of the hierarchy of power supply systems of machine-building enterprises]*”, Cand. of Tech. S. thesis, SSTU, Samara, Russia, 2009 (in Russian).
- [9] R.F. Idiatulin, “*Sovershenstvovanie ierarhicheski-strukturnogo metoda rascheta elektricheskikh nagruzok na mashinostroitel'nykh predpriyatiyakh [Improvement of the hierarchical-structural method of calculating electrical loads at machine-building enterprises]*”, Cand. of Tech. S. thesis, SSTU, Samara, Russia, 2012 (in Russian).
- [10] E.S. Ventzel, *Teoriya veroyatnostej [Probability theory]*. Moscow: Higher school, 1999 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Платонов Дмитрий Юрьевич, **Dmitriy Yu. Platonov**, postgraduate student of the Samara State Technical University, Samara, Russian Federation.

Кротков Евгений Александрович, **Evgeniy A. Krotkov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Samara State Technical University, Samara, Russian Federation.

Степанов Валентин Павлович, **Valentine P. Stepanov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Samara State Technical University, Samara, Russian Federation.