ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НАГРУЖЕНИЯ МЕХАНИЗМА ГРУЗОПОДЪЁМНОГО КРАНА ПО РАЗЛИЧНЫМ СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Ю.Е. Семёнов, *канд. техн. наук, доцент*
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула)

DOI:10.24412/2500-1000-2025-10-2-108-113

Аннотация. *Предложена без символьная форма записи уравнения для определения коэффициента нагружения крана и его механизмов, причём размерность входящих в уравнение величин жёстко не задана. Это позволило адаптировать уравнение для работы со статистическими данными, имеющими произвольные обозначения и различную размерность. Рассмотрены примеры расчёта коэффициента нагружения по статистическим данным в самой различной форме – таблица, гистограмма, график.*

Ключевые слова: *грузоподъёмный кран, механизмы крана, статистика нагружения, коэффициент нагружения, примеры расчёта.*

Коэффициент нагружения рассчитывают при определении режима работы механизмов грузоподъёмного крана. Коэффициент нагружения может принимать значения в диапазоне от нуля до единицы. Коэффициент нагружения усреднённо показывает, с какими нагрузками преимущественно работает механизм крана в процессе эксплуатации и насколько они близки к максимально возможной нагрузке. Например, если коэффициент нагружения принял значение в диапазоне от 0 до 0,125, то значит, механизм работает при нагрузках значительно меньше максимальных, если в диапазоне от 0,125 до 0,25, то в редких случаях максимальных и т.д.

Как показал анализ широко известных источников, в частности [1, 2], формула для определения коэффициента нагружения приводится всегда, однако практически отсутствуют примеры его расчёта по конкретным статистическим данным. В этой работе будут рассмотрены именно примеры расчёта коэффициента нагружения, причём по статистическим данным, представленным в самой различной форме – в виде таблицы, гистограммы, графика, а также имеющим различную размерность и обозначения. Кроме того, не меняя смысла формулы для расчёта коэффициента нагружения, будет скорректирована форма её записи, что позволит лучше адаптировать её под всё многообразие статистических данных.

Коэффициент нагружения вычисляется по формуле [1].

$$K=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{F_i}{F_{max}}\right)^3\frac{t_i}{\sum t_i}, \qquad (1)$$

где F_i – нагрузка (сила, момент), действующая на механизм в течении времени t_i; F_{max} – наибольшая нагрузка; $\sum t_i$ – суммарное время действия нагрузок на механизм за заданный срок службы; n – количество измерений нагрузки.

Формула (1) справедлива для любого механизма грузоподъёмного крана – подъёма, передвижения, поворота и других. Поэтому нагрузка F_i может измеряться в самых разных единицах – тоннах (т), Ньютонах (Н), Ньютонах на метр (Н·м) и т.д. Соответственно, обозначаться нагрузка в статистических данных тоже может по разному – Q_i, G_i, M_i и т.д. То же самое можно сказать о времени действия нагрузки t_i. Время может измеряться в секундах, минутах, часах. Однако, бывают случаи, когда приходится работать с процентами от общей продолжительности действия

нагрузок и даже количеством циклов работы механизма с определённой нагрузкой (при условии, что длительность всех циклов одинакова). Соответственно, обозначаться время действия нагрузки в статистических данных тоже может по-разному – T_i, z_i, c_i и т.д.

Учитывая всё вышесказанное, можно предложить записать формулу (1) в самом общем виде, заменив основные символьные обозначения словесными понятиями.

$$K=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\text{нагрузка}_i}{\text{максимальная нагрузка}}\right)^3\frac{\text{длительность}_i}{\text{общая длительность}}. \quad (2)$$

Помимо различий в обозначениях и единицах измерения статистические данные о нагружении механизмов крана могут сильно различаться и по форме записи. Например, они могут быть представлены в виде списка, таблицы, гистограммы, линейных и нелинейных графиков и т.д. Апробируем формулу (2) для расчёта коэффициента нагружения по различным статистическим данным.

Начнём с самого простого случая, когда статистические данные о загрузке механизма представлены в табличной форме (табл.).

Таблица. Данные о нагружении механизма подъёма крана

Величина	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	t_1	t_2	t_3	t_4
Размерность	тонны	тонны	тонны	тонны	%	%	%	%
Значение	0,7	0,8	1,5	2	35	10	10	45

Определим коэффициент нагружения, воспользовавшись формулой (2). Из Таблицы видно, что кран работает с четырьмя нагрузками 0,7; 0,8; 1,5 и 2 тонны, значит количество измеренных нагрузок $n=4$. Величины Q_i измеряются в тоннах, значит они соответствуют параметру «нагрузка$_i$». Максимальная нагрузка $Q_{max}=Q_4=2\text{тонны}$ соответствует параметру «максимальная нагрузка». В Таблице нет данных в единицах измерения времени, то есть в секундах, минутах и т.д. Однако, есть данные в процентах, которые показывают процентное отношение времени работы с каждым грузом к общему времени работы механизма подъёма. Значит, величины t_i соответствуют параметру «длительность$_i$», а сумма t_i параметру «общая длительность»:
$\sum t_i=t_1+t_2+t_3+t_4=35+10+10+45=100\%$. Тогда формула (2) применительно к этой задаче будет выглядеть так

$$K=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\text{нагрузка}_i}{\text{максимальная нагрузка}}\right)^3\frac{\text{длительность}_i}{\text{общая длительность}}=\sum_{i=1}^{4}\left(\frac{Q_i}{Q_{max}}\right)^3\frac{t_i}{\sum t_i},$$

$$K=\left(\frac{0,7}{2}\right)^3\cdot\frac{35}{100}+\left(\frac{0,8}{2}\right)^3\cdot\frac{10}{100}+\left(\frac{1,5}{2}\right)^3\cdot\frac{10}{100}+\left(\frac{2}{2}\right)^3\cdot\frac{45}{100}=0,015+0,0064+0,042+0,45=0,51\cdot$$

Теперь рассмотрим случай, когда данные о нагружении механизма представлены в виде гистограммы (рис. 1). На гистограмме G_i и G_{max} – текущее и максимальное значение веса груза, z_i – число циклов работы механизма, выполняемых с грузом весом G_i, причём длительность всех циклов одинакова.

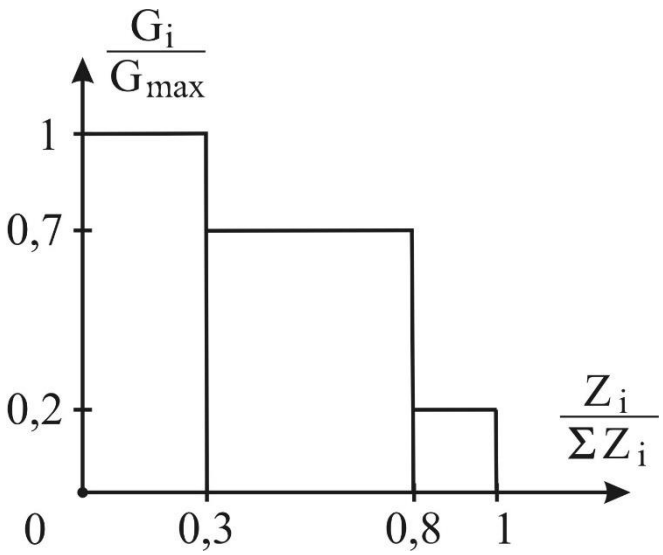

Рис. 1. Гистограмма повторяемости весов груза

Для расчёта коэффициента нагружения опять используем формулу (2). На гистограмме три участка, значит количество измеренных нагрузок $n = 3$. Значения веса поднимаемых грузов G_i даны на гистограмме в безразмерной форме, как результат деления на максимальный вес груза G_{max}. Тогда

$$\frac{\text{нагрузка}_i}{\text{максимальная нагрузка}} = \frac{G_i}{G_{max}}.$$

Число циклов работы с грузами z_i тоже дано на гистограмме в безразмерной форме, как результат деления на общее количество (сумму) всех циклов. Тогда

$$\frac{\text{длительность}_i}{\text{общая длительность}} = \frac{z_i}{\sum z_i}.$$

С учётом этих соображений формула (2) для нашей гистограммы примет вид

$$K = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\text{нагрузка}_i}{\text{максимальная нагрузка}} \right)^3 \frac{\text{длительность}_i}{\text{общая длительность}} = \sum_{i=1}^{3} \left(\frac{G_i}{G_{max}} \right)^3 \frac{z_i}{\sum z_i}.$$

Численные значения величин, входящих в эту формулу записаны на самой гистограмме (рис. 1):

$$\frac{G_1}{G_{max}} = 1;\ \frac{G_2}{G_{max}} = 0,7;\ \frac{G_3}{G_{max}} = 0,2.$$

Отметим, что при безразмерном решении задачи сумма всех циклов $\sum z_i$ должна быть равна единице. Тогда значение каждой величины z_i вычисляется как разница правой и левой границ i-ого участка:

$$\frac{z_1}{\sum z_i} = 0,3 - 0 = 0,3;\ \frac{z_2}{\sum z_i} = 0,8 - 0,3 = 0,5;\ \frac{z_3}{\sum z_i} = 1 - 0,8 = 0,2.$$

Выполним проверку $\sum z_i = \frac{z_1}{\sum z_i} + \frac{z_2}{\sum z_i} + \frac{z_3}{\sum z_i} = 0,3 + 0,5 + 0,2 = 1.$

Проверка выполняется.

Теперь рассчитаем значение коэффициента нагружения

$$K = \sum_{i=1}^{3} \left(\frac{G_i}{G_{max}} \right)^3 \frac{z_i}{\sum z_i} = 1^3 \cdot 0,3 + 0,7^3 \cdot 0,5 + 0,2^3 \cdot 0,2 = 0,3 + 0,1715 + 0,0016 = 0,473.$$

И, наконец, рассмотрим случай, когда данные о нагружении механизма представлены в виде произвольной кривой, не имеющей математического описания (рис. 2).

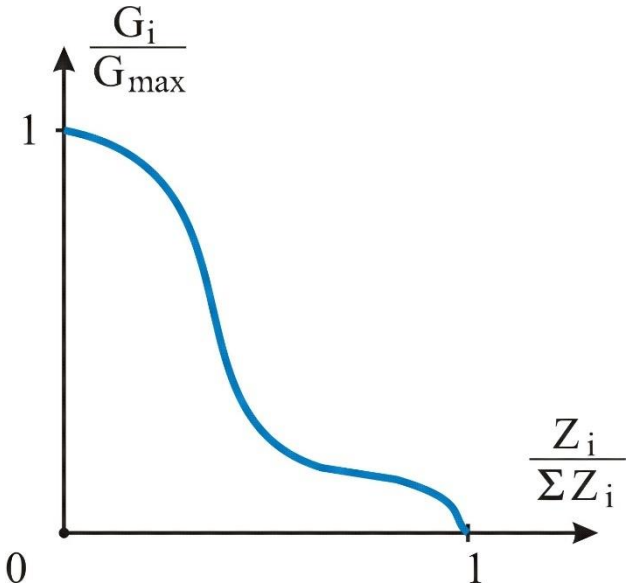

Рис. 2. График повторяемости весов груза

Разобьём график на десять равных участков по оси абсцисс и оси ординат (рис. 3), то есть создадим координатную сетку. Возможно и другое количество участков, например, пять или двадцать. Однако, меньшее количество участков приведёт к уменьшению точности вычислений, а большее – к увеличению трудоёмкости вычислений.

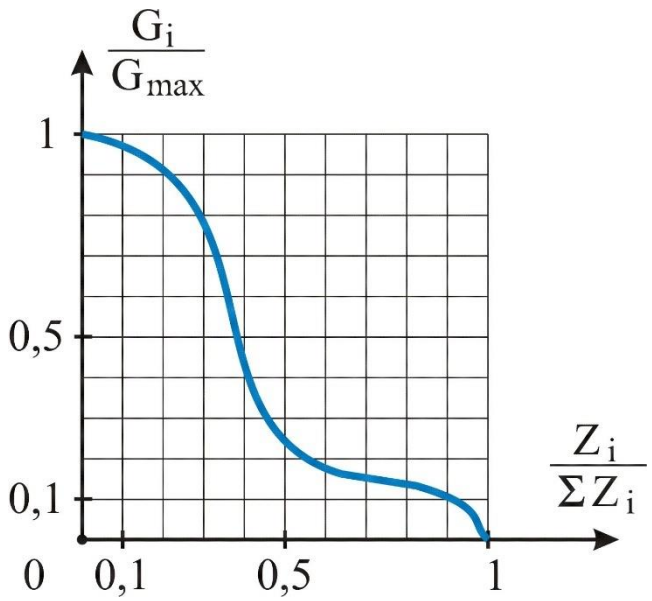

Рис. 3. График повторяемости весов груза в координатной сетке

Теперь аппроксимируем кривую на рисунке 3 гистограммой из десяти равных по длине участков. Высота каждого участка гистограммы будет приблизительно соответствовать высоте средней точки отрезка кривой, проходящему через этот участок (рис. 4).

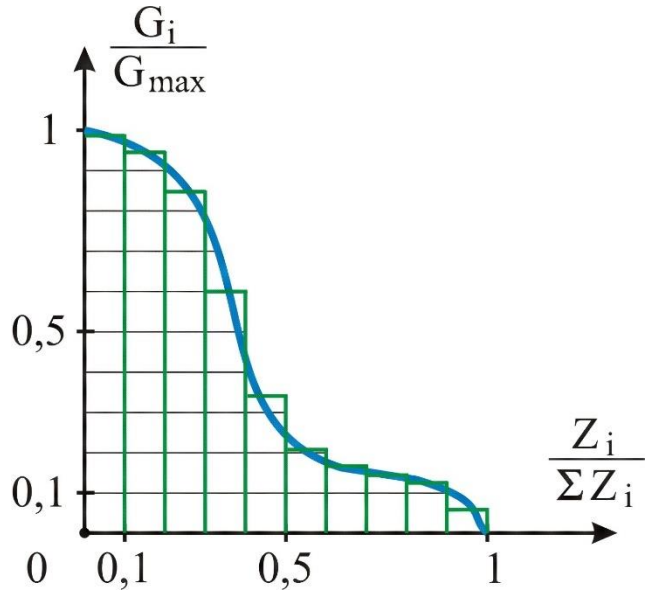

Рис. 4. График повторяемости весов груза, аппроксимированный гистограммой

Теперь, после того как произвольная кривая была преобразована в гистограмму, коэффициент нагружения можно найти, анализируя полученную гистограмму. Для этого сноса воспользуемся формулой (2). На гистограмме десять участков, значит количество измеренных нагрузок $n = 10$.

$$\frac{\text{нагрузка}_i}{\text{максимальная нагрузка}} = \frac{G_i}{G_{max}}$$, причём согласно рис. 4

$\frac{G_1}{G_{max}} \approx 0,98$; $\frac{G_2}{G_{max}} \approx 0,95$; $\frac{G_3}{G_{max}} \approx 0,85$; $\frac{G_4}{G_{max}} \approx 0,6$; $\frac{G_5}{G_{max}} \approx 0,34$;

$\frac{G_6}{G_{max}} \approx 0,21$; $\frac{G_7}{G_{max}} \approx 0,17$; $\frac{G_8}{G_{max}} \approx 0,15$; $\frac{G_9}{G_{max}} \approx 0,13$; $\frac{G_{10}}{G_{max}} \approx 0,05$.

$\frac{\text{длительность}_i}{\text{общая длительность}} = \frac{z_i}{\sum z_i} = 0,1$, так как ширина всех участков гистограммы одинаковая.

Теперь можно преобразовать формулу (2) применительно к этой задаче и выполнить расчёт

$$K = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\text{нагрузка}_i}{\text{максимальная нагрузка}} \right)^3 \frac{\text{длительность}_i}{\text{общая длительность}} = \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{G_i}{G_{max}} \right)^3 \frac{z_i}{\sum z_i} =$$

$$= 0,98^3 \cdot 0,1 + 0,95^3 \cdot 0,1 + 0,85^3 \cdot 0,1 + 0,6^3 \cdot 0,1 + 0,34^3 \cdot 0,1 + 0,21^3 \cdot 0,1 + 0,17^3 \cdot 0,1 +$$

$$+ 0,15^3 \cdot 0,1 + 0,13^3 \cdot 0,1 + 0,05^3 \cdot 0,1 = 0,0941 + 0,0857 + 0,0614 + 0,0216 + 0,0039 +$$

$$+ 0,0009 + 0,0005 + 0,0003 + 0,0002 + 0,0001 = 0,2687$$

Таким образом, предложенная в работе универсальная, без символьная форма записи зависимости для определения коэффициента нагружения позволяет работать со статистическими данными, представленными в самой различной форме, имеющими произвольные обозначения и размерность.

Библиографический список

1. Александров М.П. Подъёмно-транспортные машины: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с.

2. Вайнсон А.А. Подъёмно-транспортные машины: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 536 с.

DEFINITION OF FACTOR OF LOADING OF THE MECHANISM OF THE CARGOCRANE ON THE VARIOUS STATISTICAL DATA

Y.E. Semenov, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*
Tula State University
(Russia, Tula)

Abstract. *The form of record of the equation for definition of factor of loading of the crane and his mechanisms is offered without symbols, and the dimension of sizes, included in the equation, rigidly is not given. It has allowed to adapt the equation for work with the statistical data having any designations and various dimension. The examples of account of factor of loading on the statistical data in the most various forms – table, step diagram, any diagram are considered.*

Keywords: *cargo crane, mechanisms of the crane, statistics of loading, factor of loading, examples of account.*