

УДК 621.86

УРАВНИВАНИЕ ОПОРНЫХ НАГРУЗОК НА ХОДОВЫЕ КОЛЕСА ГРУЗОВОЙ ТЕЛЕЖКИ КРАНА МОСТОВОГО ТИПА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УНИВЕРСАЛЬНОЙ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ

Гончаров К.А., Денисов И.А.

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

Описан подход к проектной процедуре уравнивания опорных нагрузок на ходовые колеса грузовой тележки. Выявлена методологическая неопределённость в вопросе проектирования тележек, приводящая к усложнению процесса проектирования. Сформирована и решена задача компенсации отклонения положения общей равнодействующей сил, действующих на тележку, от точки, характеризующей наилучшее распределение нагрузки между колёсами, путём введения условной массы с использованием соответствующих зависимостей и накладываемых ограничений. Рассмотрены различные способы размещения реальных масс, формирующих условную массу, в рамках универсальной расчётной схемы металлоконструкции. Рассмотрен пример решения представленной задачи для грузовой опорной тележки мостового крана. Представлены выводы о целесообразности использования различных схем расположения масс в зависимости от проектной ситуации. Установлена необходимость применения метода шарнирной рамы для определения опорных нагрузок на ходовые колеса тележки на основе универсальной компоновочной схемы.

Ключевые слова: мостовой кран, грузовая тележка, равнодействующая сила, условная масса, диагональное уравнивание, хордовое уравнивание, угловое уравнивание, смешанное уравнивание.

DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-280-288

Определяющей проектной процедурой, формирующей итоговую компоновочную схему крановой тележки в целом, является уравнивание опорных нагрузок, приходящихся на её ходовые колеса.

Общепринятый в практике проектирования грузовых тележек кранов мостового типа принцип уравнивания опорных нагрузок на их ходовые колеса заключается в поиске такого положения равнодействующей всех нагрузок, действующих на тележку, при котором опорные усилия (в зависимости от применяемой гипотезы расчета [4]) примут значения в рамках заданных диапазонов их отклонения [1]. При этом стоит отметить два проектных допущения данного подхода:

1) координаты центра тяжести и значение собственного веса металлоконструкции тележки, как правило, не учитываются при определении положения общей равнодействующей всех нагрузок, что связано с неопределенностью её конфигурации при проведении процедуры компоновки тележки; при этом металлоконструкция предполагается симметричной относительно центральных геометрических осей координат с центром масс, совпадающим с центром указанной координатной системы; при известной конфигурации металлической конструкции тележки её вес может входить в структуру общей

равнодействующей, смещая её в рамках принятой системы координат;

2) корректирование положения общей равнодействующей (поиск её координат, приемлемых с позиции величин допустимых отклонений опорных нагрузок) производится путем перекомпоновки механизмов тележки: смещение механизмов в целом, введение в их структуру «плавающих» валов, различные варианты размещения верхних блоков механизмов подъема и т.п.

Первое из приведенных допущений в значительной степени создает методологическую неопределенность в вопросе проектирования металлоконструкций тележек: с одной стороны формируется отправная точка для проектирования металлоконструкции в виде набора ограничений, а с другой – образуется ряд проектных несоответствий и противоречий, таких как необходимость создания максимально возможной симметрии металлоконструкции при неопределенности положения механизмов, фактическое итоговое формирование веса металлоконструкции в зависимости от необходимости смещения его положения (величина дополнительных масс для корректирования положения веса, координаты их приложения, конфигурация рамы тележки и т.д.). Данное обстоятельство приводит к созданию сложных конфигураций металлических конструкций крановых

тележек с завышенными коэффициентами запаса [2, 3].

Второе допущение позволяет сделать вывод о том, что невозможно окончательно сформировать какой-либо из механизмов крановой тележки без проведения процедуры уравнивания нагрузок на её ходовые колеса путём приведения общей равнодействующей в геометрический центр опорной конструкции.

В работе [2] была предложена универсальная компоновочная схема металлоконструкции грузовой тележки крана мостового типа. Принцип применения данной схемы в процессе проектирования крановых тележек заключается в следующих положениях:

- определенность конфигурации металлоконструкции тележки в начале процедуры проектирования последней;
- компоновка полиспастов механизмов подъема в зависимости от их количества (один или два) производится таким образом, чтобы центр тяжести груза механизма главного подъема в горизонтальной плоскости совпадал с геометрическим центром тележки, а центр тяжести груза механизма вспомогательного подъема в горизонтальной плоскости максимально был приближен к геометрическому центру металлоконструкции тележки;
- уравнивание нагрузок от масс элементов механизмов производится расстановкой дополнительных масс (элементов металлоконструкции) на несущих элементах металлоконструкции тележки.

Согласно приведенным положениям формулируется задача уравнивания нагрузок на ходовые колеса грузовых крановых тележек, заключающаяся в определении числа уравнивающих масс, их величин и координат, решение которой предлагается в настоящей статье.

Общая расчетная схема тележки (вид сверху) представлена на рис. 1.

Нагрузка на ходовые колеса определяется величиной равнодействующей Q всех вертикальных сил, приложенных к тележке, и её положением (координаты a_Q и b_Q).

Скомпенсируем действие Q введением в конструкцию дополнительной условной массы M со следующими ограничениями:

- условная масса M располагается в координатной четверти (при совмещении нача-

ла координат с геометрическим центром тележки) диагонально противоположной четверти, включающей Q ;

- условная масса M (её центр тяжести) расположена на прямой, соединяющей геометрический центр тележки точку $O(0; 0)$ и точку $(b_Q; a_Q)$, в связи с чем в соответствующих пределах справедливо условие

$$Y = \pm \frac{a_Q}{b_Q} X, \quad (1)$$

где X и Y – координаты расположения условной массы M .

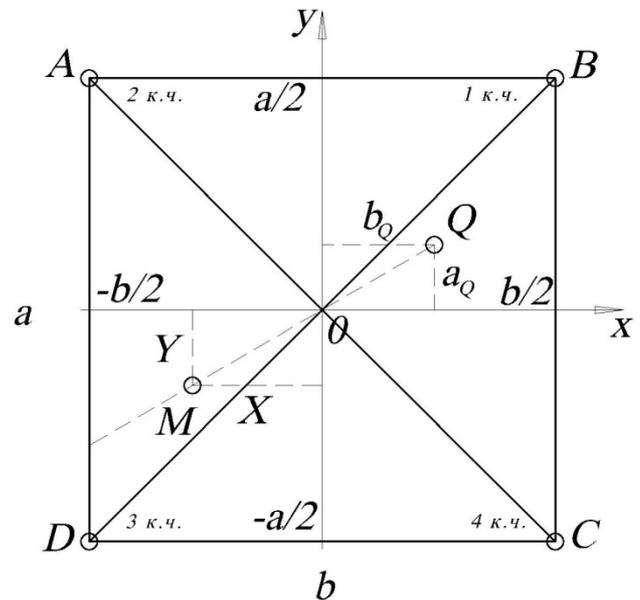


Рис. 1. Общая расчетная схема грузовой крановой тележки (вид сверху)

Компенсация действия Q введением условной массы M соответствует зависимостям

$$\frac{Qb_Q + MgX}{Q + Mg} = 0; \quad \frac{Qa_Q + MgY}{Q + Mg} = 0. \quad (2)$$

Задавая последовательно величины координаты X в областях значений $[-b/2; 0)$ или $(0; b/2]$ в зависимости от координатной четверти, в которой расположена Q , строится зависимость необходимой величины условной массы M от абсциссы её положения. Данная зависимость представляет собой гиперболу, определяемую с учетом зависимостей (1) и (2) уравнением

$$M(X) = \frac{Qb_Q}{Xg} = 0. \quad (3)$$

При анализе зависимости (3) производится выбор рационального сочетания координат положения и величины условной массы M , при этом необходимо стремиться к минимизации значения M с учетом различных конструктивных факторов. Условная масса M представляет собой фантомную величину – равнодействующую массу, формируемую реальными противовесами.

Введем в решение задачи гипотезу о том, что величина и координаты положения условной массы M определяются тремя реальными массами, расположенными на металлоконструкции тележки m_1, m_2, m_3 . С учетом структуры универсальной компоновочной схемы, в которой основную несущую нагрузку воспринимают диагональные элементы рамы, а также главные хордовые (определяющие колею и базу тележки), выделим следующие способы возможной расстановки масс m_1, m_2, m_3 :

1) каждая из масс m_1, m_2, m_3 устанавливается на диагональном несущем элементе в координатных четвертях, не содержащих равнодействующую Q (диагональное уравнение);

2) каждая из масс m_1, m_2, m_3 устанавливается на хордовом несущем элементе, при этом свободной остается одна из двух хорд, примыкающих к координатной четверти, содержащей равнодействующую Q (хордовое уравнение);

3) каждая из масс m_1, m_2, m_3 устанавливается в угловых точках тележки в координатных четвертях, не содержащих равнодействующую Q (угловое уравнение), что является частным случаем двух предыдущих способов;

4) массы m_1, m_2, m_3 устанавливаются как на хордовых, так и на диагональных несущих элементах (смешанное уравнение).

Рассмотрим подробнее приведенные способы. Для каждого из них справедливы зависимости

$$\begin{aligned} \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3}{m_1 + m_2 + m_3} &= X; \\ \frac{m_1y_1 + m_2y_2 + m_3y_3}{m_1 + m_2 + m_3} &= Y; \\ m_1 + m_2 + m_3 &= M \end{aligned} \quad (4)$$

где x_1, x_2, x_3 и y_1, y_2, y_3 – координаты расположения масс m_1, m_2, m_3 соответственно.

При диагональном уравнении координаты положения масс m_1, m_2, m_3 подчиняются зависимостям

$$\begin{aligned} y_1 &= \pm \frac{a}{b} x_1; \\ y_2 &= \pm \frac{a}{b} x_2; \\ y_3 &= \pm \frac{a}{b} x_3, \end{aligned} \quad (5)$$

где a и b – соответственно база и колея тележки. Знак перед функцией определяется координатной четвертью расположения соответствующей массы.

При этом необходимо сформулировать дополнительные условия, определяющие технические ограничения на описанный математический функционал:

$$\begin{aligned} -\frac{b}{2} &\leq x_i < 0; \\ 0 < x_j &\leq \frac{b}{2}; \\ -\frac{a}{2} &\leq y_k < 0; \\ 0 < y_m &\leq \frac{a}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где x_i, x_j и y_k, y_m – координаты расположения масс m_1, m_2, m_3 в общем виде при неопределенности их расположения по координатным четвертям.

Хордовое уравнение также оперирует зависимостями (4), при этом координаты положения масс подчиняются уравнениям

$$\begin{aligned} y_{i,j,k} &= \pm \frac{a}{2}; \\ x_{i,j,k} &= \pm \frac{b}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Дополнительные условия при хордовом уравнении формулируются следующим образом

$$\begin{aligned} -\frac{b}{2} &\leq x_i \leq \frac{b}{2}; \\ -\frac{a}{2} &\leq y_j \leq \frac{a}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Угловое уравнение является частным случаем диагонального и хордового. При угловом уравнении координаты положения масс m_1, m_2, m_3 определены, и решение задачи сводится к определению величин этих масс.

Смешанное уравнение в своей структуре оперирует уравнениями и неравенствами (4) – (7), используемыми фрагментарно в зависимости от способа расположения каждой конкретной массы.

При проведении проектной процедуры приведения равнодействующей внешних сил к геометрическому центру тележки целесообразно предварительно решать задачу без учета ограничений (6), (8). Увеличение значения той или иной координаты в данном случае позволяет определить направление корректирования каждой из трех масс с учетом уменьшения значений их координат до пределов, установленных ограничениями.

В качестве примера рассмотрим применение предложенных выше способов уравновешивания на примере грузовой тележки мо-

стового крана при величине $Q = 294,3$ кН (что приблизительно соответствует массе груза 25 т и эквиваленту других неучтенных нагрузок 5 т). Координаты $a_Q = 0,1$ м, $b_Q = 0,15$ м. База тележки $b = 3$ м, колея тележки $a = 2$ м.

Равнодействующая Q расположена в первой координатной четверти (+; +), в связи с чем условную массу M расположим в диагонально противоположной третьей координатной четверти (-; -). Функция (3) примет вид

$$M(X) = -\frac{Qb_Q}{Xg} = -\frac{294,3 \cdot 0,15}{X \cdot 9,81} = -\frac{4,5}{X}.$$

Из анализа графика функции (рис. 2) примем величину $M = 3,75$ т с координатами (-1,2; -0,8).

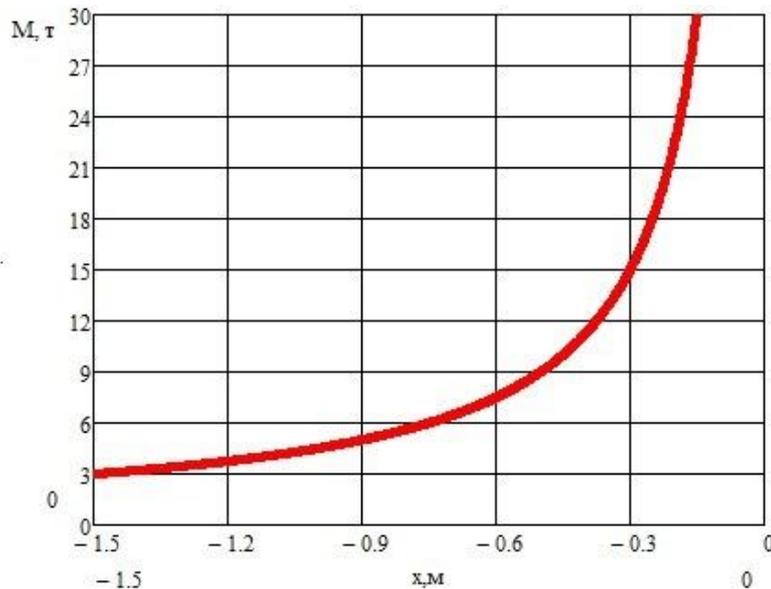


Рис. 2. График изменения массы M в зависимости от абсциссы её положения

Диагональное уравнение.

Массу m_1 расположим во второй координатной четверти, массу m_2 – в третьей, массу m_3 – в четвертой. Условия (5) примут вид

$$y_1 = -\frac{a}{b}x_1;$$

$$y_2 = \frac{a}{b}x_2,$$

$$y_3 = -\frac{a}{b}x_3.$$

Предварительно примем взаимное равенство масс m_1, m_2, m_3 . Без учета ограничений (6) при решении задачи (зависимости (4) и

(5)), задавая величину $x_1 = -1,5$ м, получим значительное превышение допустимых условий (6) координатами x_2 и y_2 . Изменим соотношение масс m_1, m_2, m_3 в пропорциях $m_1 = 0,1M, m_2 = 0,8M, m_3 = 0,1M$. При последовательном изменении координаты $x_1 = -1,5$ м, $x_1 = -1,25$ м, $x_1 = -1$ м получим график, представляющий собой схему пространственного расположения масс в проекции на поверхность тележки (рис. 3). Схема приложения сил к металлоконструкции тележки показана на рис. 4.

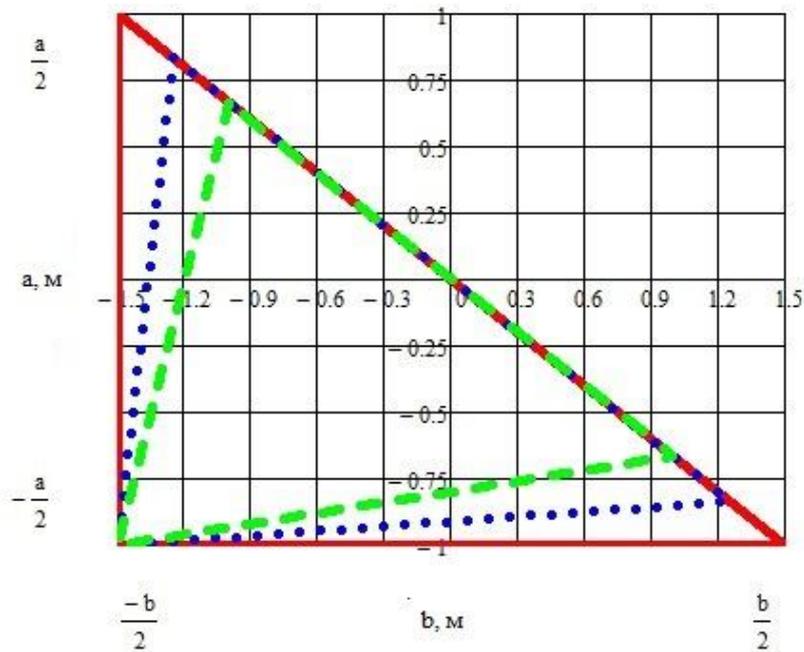


Рис. 3. Схема пространственного расположения масс в проекции на поверхность тележки при диагональном уравнивании

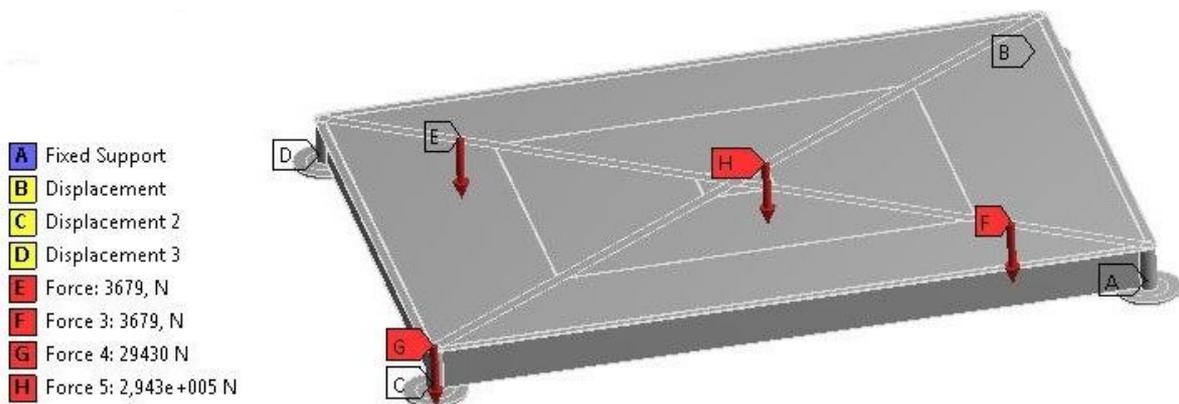


Рис. 4 Схема приложения сил к металлоконструкции тележки при диагональном уравнивании масс

При указанном соотношении масс ($m_1 = 0,1M = 0,375$ т, $m_2 = 0,8M = 3$ т, $m_3 = 0,1M = 0,375$ т) их размещение (согласно рис. 3) производится на угловом сегменте тележки в третьей координатной четверти, а также на одном из главных диагональных несущих элементов.

Хордовое уравнивание.

Массу m_1 расположим на хорде, соответствующей координате $y_1 = 1$ м, массу m_2 – на хорде, соответствующей координате $x_2 = -1,5$ м, массу m_3 – на хорде, соответствующей координате $y_1 = -1$ м. Условия (7) примут вид

$$y_1 = \frac{a}{2}; \quad x_2 = -\frac{b}{2}; \quad y_3 = -\frac{a}{2}.$$

Предварительно примем взаимное равенство масс m_1, m_2, m_3 . Без учета ограничений (8) при решении задачи (зависимости (4) и (7)), задавая величину $x_1 = -1,5$ м, получим незначительное превышение допустимых условий (7) координатой y_2 . Изменим соотношение масс m_1, m_2, m_3 в пропорциях $m_1 = 0,1M, m_2 = 0,6M, m_3 = 0,3M$. При последовательном изменении координаты $x_1 = -1,2$ м, $x_1 = -1$ м, $x_1 = -0,5$ м также построим график, представляющий собой схему пространственного расположения масс в проекции на поверхность тележки (рис. 5). Схема приложения сил к металлоконструкции тележки показана на рис. 6.

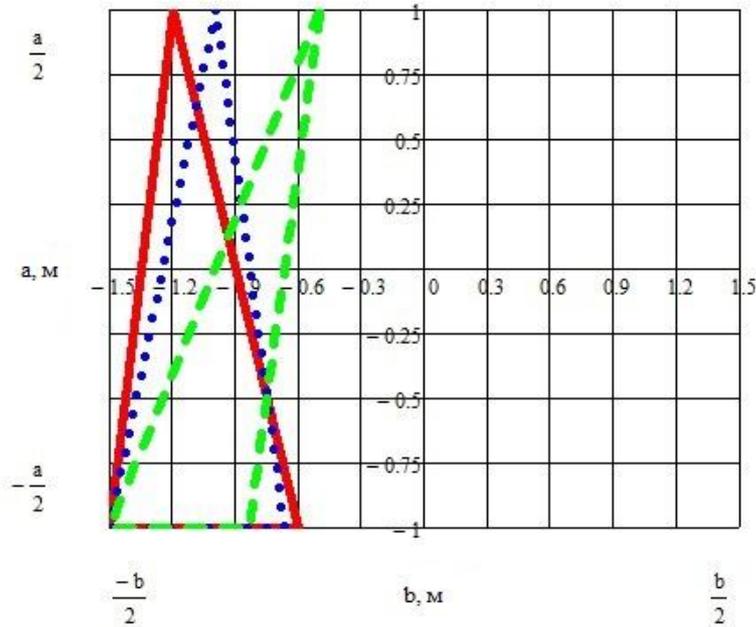


Рис. 5. Схема пространственного расположения масс в проекции на поверхность тележки при хордовом уравнивании

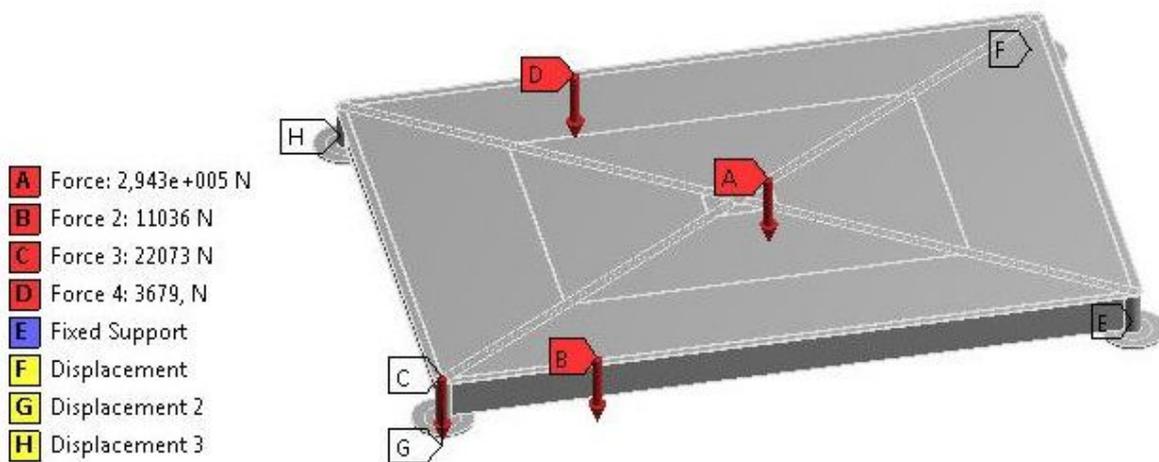


Рис. 6 Схема приложения сил к металлоконструкции тележки при хордовом уравнивании масс

При указанном соотношении масс ($m_1 = 0,1M = 0,375$ т, $m_2 = 0,6M = 2,25$ т, $m_3 = 0,3M = 1,125$ т) их размещение (согласно рис. 5, 6) производится на угловом сегменте тележки в третьей координатной четверти, а также на двух противоположных хордах, определяемых предельными значениями колеи тележки a .

Угловое уравнивание.

Зададим координаты расположения масс $m_1 (-1,5$ м; 1 м), $m_2 (-1,5$ м; -1 м), $m_3 (1,5$ м; -1 м). Решая совместно уравнения (4) относительно указанных масс получим $m_1 = 0,1M = 0,375$ т, $m_2 = 0,8M = 3$ т, $m_3 = 0,1M = 0,375$ т,

что повторяет один из результатов диагонального уравнивания.

Смешанное уравнивание.

Предположим, что массы m_1 и m_2 устанавливаются на хордах по аналогии с процедурой хордового уравнивания, а масса m_3 размещается на диагональном несущем элементе. Зависимости (5) и (7) примут вид

$$y_1 = \frac{a}{2}, \quad x_2 = -\frac{b}{2}, \quad y_3 = -\frac{a}{b}x_3.$$

Приемлемого решения при смешанном уравнивании удастся достигнуть при соотношении масс ($m_1 = 0,05M = 0,1875$ т, $m_2 = 0,85M = 3,1875$ т, $m_3 = 0,1M = 0,375$ т). Их размещение при значениях координат

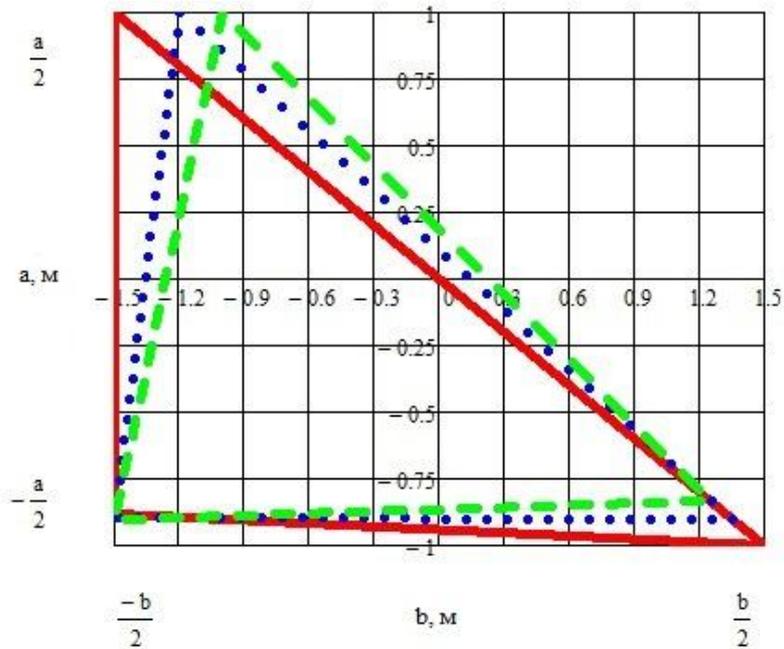


Рис. 7. Схема пространственного расположения масс в проекции на поверхность тележки при смешанном уравнении

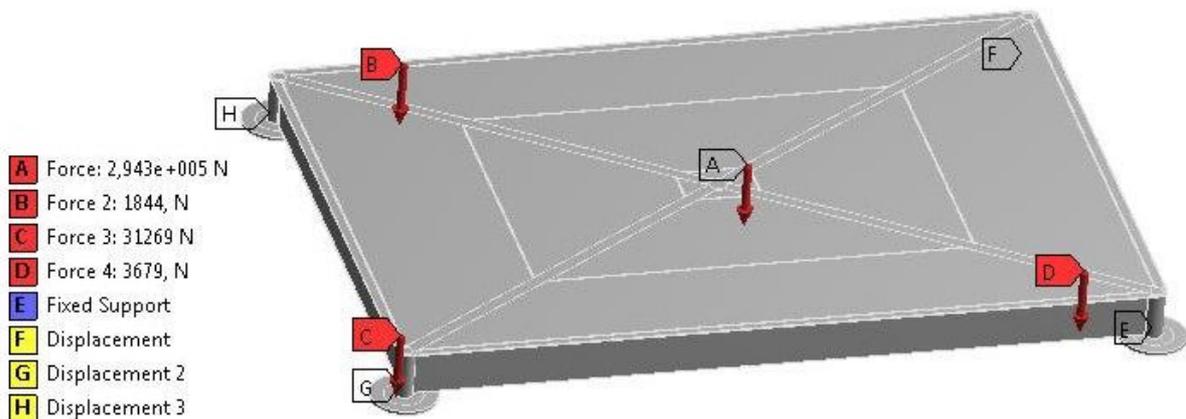


Рис. 8 Схема приложения сил к металлоконструкции тележки при смешанном уравнении масс

$x_1 = -1,5$ м, $x_1 = -1,2$ м, $x_1 = -1$ м представлено на рис. 7. Схема приложения сил к металлоконструкции тележки показана на рис. 8.

Следует отметить, что во всех четырех случаях анализ опорных реакций, полученных с помощью численного решения с применением конечно-элементной модели тележки, показал зависимость их величин не только от близости общей равнодействующей к геометрическому центру тележки, но и от конфигурации сил, формирующих данную равнодействующую. Несмотря на то, что общая равнодействующая была приведена к центру, отдельный учет усилия Q и весов трех уравнивающих масс приводил к разно-

сти усилий в опорах до 20%, что говорит о недостаточности приведения равнодействующей всех, действующих на металлоконструкцию сил, к её геометрическому центру для выравнивания опорных нагрузок на ходовые колеса тележки.

Аналитическое определение нагрузок на ходовые колеса тележек производят методами жесткой или шарнирной рамы [5]. При использовании в рамках данного расчета общей равнодействующей всех сил оба способа дают одинаковый результат (равенство всех четырех опорных нагрузок). При учете отдельно каждой нагрузки без приведения к общей равнодействующей в рамках предложенных

методов уравнивания подобный результат дает метод жесткой рамы. Метод шарнирной рамы (также при учете отдельно каждой нагрузки без приведения к общей равнодействующей) дает максимально приближенные величины нагрузок на колеса к результатам конечно-элементного анализа. Данное установленное обстоятельство требует проведения дополнительных исследований и численных экспериментов.

В случае нахождения нагрузок на ходовые колеса при отдельном учете каждой силы, действующей на тележку (что, как описано выше, дает значительно более точный результат), предложенные способы уравнивания необходимо применять согласно следующему алгоритму:

1) определяются доли опорных нагрузок на колеса отдельно от каждой силы, действующей на тележку по методу шарнирной рамы;

2) в зависимости от полученных значений усилий в опорах определяются квадранты, соответствующие самому нагруженному и ненагруженному колесам;

3) величины уравнивающих масс определяются в каждом из квадрантов, соответствующих трем недогруженным колесам, согласно разнице усилий, приходящихся на самое нагруженное колесо и колесо в соответствующем квадранте;

4) размещение уравнивающих масс производят в зависимости от выбранного способа уравнивания с учетом условий (5) – (8), при этом уравнивающую массу в каждом квадранте можно дополнительно разбивать на более мелкие составляющие, что позволяет расширить возможности процедуры уравнивания.

Анализируя результаты решения задачи уравнивания нагрузок на ходовые колеса грузовой тележки на основе универсальной компоновочной схемы различными способами в рамках приведенного примера, можно сделать вывод о целесообразности использования способа хордового уравнивания, дающего наиболее сбалансированный результат с позиции распределения уравнивающих масс.

Предложенное в данной статье решение представляет собой упорядоченную методи-

ку одной из процедур компоновки тележки с опорой на четыре разработанных способа уравнивания. При этом в зависимости от исходных данных, целесообразно использовать все четыре способа с целью нахождения рациональных решений в различных проектных ситуациях.

Список литературы

1. Александров, М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров, Л.Н. Колобов, Н.А. Лобов. – М: Машиностроение, 1986. – 400 с.

2. Гончаров, К.А. Универсальная компоновочная схема металлоконструкции грузовой тележки крана мостового типа / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – №1. – С 60-66.

3. Денисов, И.А. Конструкции и методы проектирования опорных грузовых тележек кранов мостового типа. / И. А. Денисов, Д.А. Простаков // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. К.А. Гончарова. – Брянск: БГТУ, 2016. – С. 60.

4. Шеффлер, М. Основы расчёта и конструирования подъемно-транспортных машин / М. Шеффлер, Г. Пайер, Ф. Курт. – М: Машиностроение, 1980 – 255 с.

5. Гохберг, М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / М.М. Гохберг. – Л.: Машиностроение, 1969. – 520 с.

Об авторах

Гончаров Кирилл Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», ptm_bstu@mail.ru.

Денисов Илья Александрович – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», ilia.denisow@yandex.ru.

EQUALIZATION OF BEARING LOADS ON RUNNING WHEELS OF OVERHEAD CRANE LOAD TROLLEY WHEN APPLYING MULTI-PURPOSE LAYOUT DRAWING

Goncharov K.A., Denisov I.A.

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation

The paper deals with the approach to design of the equalization procedure of bearing loads on running wheels of a load trolley. Methodological ambiguity in the trolley design issue resulting in complication of the designing process was identified. There was formed and solved the task concerning compensation of variation in the position of the common resultant of forces acting on the trolley from the point characterizing optimal load distribution between the wheels. This distribution was achieved by introducing a conventional mass and using appropriate dependencies and imposed limitations. Different options for arrangement of actual masses which form the conventional mass under the multi-purpose metal construction scheme were considered. An example on how to address the presented issue for the overhead crane load trolley was considered. The paper presents the findings of usefulness of various schemes of mass arrangement depending on a design situation. The need to apply the hinged frame method for determining bearing loads on the running wheels of the trolley based on the multi-purpose layout drawing was identified.

Key words: overhead crane; load trolley; equivalent force; conventional mass; diagonal equalization; chord equalization; angular equalization; mixed equalization.

DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-280-288

References

1. Aleksandrov M.P., Kolobov L.N., Lobov N.A. *Gruzopodyemnye mashiny* [Hoisting machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 186 p. (In Russian)

2. Goncharov K.A., Denisov I.A. Multipurpose layout drawing of metalware of bridge crane load trolley. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.1, pp. 60-66. doi: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-01-60-66>. (In Russian)

3. Denisov I.A., Prostakov D.A. Constructions and design methods of support trolleys of bridge type cranes. *Sbornik materialov vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnoe razvitie podzemno-transportnoy tekhniki»*. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskiy Universitet, 2016, pp. 36-43. (In Russian)

4. Sheffler M, Pajer G, Kurth F *Osnovy raschyeta i konstruirovaniya podzemno-transportnykh mashin* [Basis for the calculation and design of lifting-transport machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1980. 255 p. (In Russian)

5. Gokhberg M.M. Metal constructions of hoisting machines. Leningrad, Mashinostroenie, 1969. 520 p. (In Russian)

Authors' information

Kirill A. Goncharov – PhD in Technical Sciences, associate Professor, head of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia, ptm_bstu@mail.ru.

Iliya A. Denisov – postgraduate student of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia, ilia.denisov@yandex.ru.

Дата публикации
(Date of publication):
25.09.2017

