

## ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ ОКРУЖНЫХ УСИЛИЙ ПРИВОДА МАЯТНИКОВОЙ ПОДВЕСНОЙ КАНАТНОЙ ДОРОГИ

Из всех видов транспорта канатные дороги относятся к числу немногих, классифицируемых как объекты повышенной опасности [1]. Это, в первую очередь, объясняется большой ответственностью транспортировки грузов и, особенно, людей на значительном расстоянии от земли. Нарушение работоспособности любого элемента может привести к катастрофическим последствиям, поэтому их конструкция, методы проектирования и контроля постоянно совершенствуются [2, 3, 4].

При эксплуатации существующих, использовании бывших в употреблении (зачастую иностранных) и проектировании новых канатных дорог возникает необходимость построения диаграмм окружных усилий, отражающих изменение окружного усилия привода во времени или как функцию положения вагонов при различных режимах нагружения. Такие диаграммы позволяют определить средние и пиковые значения нагруженности элементов привода, его мощности, а также оценить состояние оборудования после длительной эксплуатации, что, безусловно, является необходимым с точки зрения обеспечения безопасности грузо- и пассажироперевозок.

В работе [5] изложена методика построения диаграмм окружных усилий экспериментальным путем, что удобно при оценке состояния оборудования используемых и бывших в употреблении, но вновь монтируемых и вводимых в эксплуатацию канатных дорог. Однако, такой подход не может быть использован для анализа нагруженности элементов привода при внесении изменений в конструкцию действующих (например, описанных в работе [6]) или проектировании новых дорог. Поэтому целью данной работы является разработка методики, позволяющей на основании теоретических зависимостей построить диаграммы окружных усилий на этапе проектирования или оценки целесообразности проведения модернизации канатной дороги.

Этапы аналитического и экспериментального моделирования рассмотрим на примере маятниковой пассажирской подвесной канатной дороги «Мисхор – Ай-Петри» (нижний участок), схема профиля которой приведена на рисунке 1.

Построение диаграммы окружных усилий привода, полученных экспериментальным путем, основывается на выражении, определяющем зависимость вращательного момента  $M$  вала электродвигателя от силы тока  $I$ :

$$M = k\Phi \cdot I, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от особенностей конструкции двигателя:

$\Phi$  – поток возбуждения.

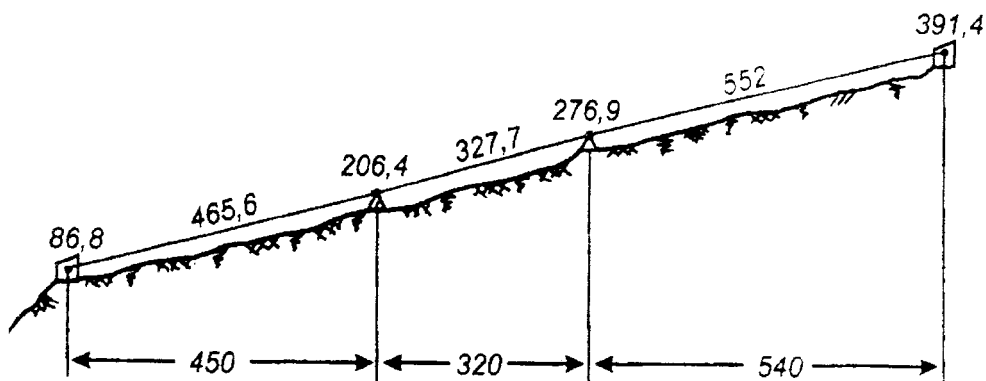


Рисунок 1 – Профиль дороги

Учитывая относительную стабильность величины  $k\Phi$  во всех режимах работы и возможность ее определения по номинальным параметрам двигателя, запишем в виде:

$$k\Phi = \frac{M_n}{I_n}. \quad (2)$$

где  $M_n$  – номинальный вращательный момент на валу электродвигателя при номинальных значениях мощности двигателя  $N_n$  и частоты вращения вала  $n_n$

$$M_n = 9550 \frac{N_n}{n_n}; \quad (3)$$

$I_n$  – номинальный ток двигателя (паспортная характеристика).

Зная диаметр приводного шкива  $D_{ш}$ , передаточное отношение  $i_p$  и коэффициент полезного действия  $\eta_{мех}$  привода, можем установить зависимости между окружным усилием  $F$  и силой тока  $I$  в режимах работы:

- силовом

$$F = \frac{2k\Phi i_p \eta_{мех}}{D_{ш}} \cdot I; \quad (4)$$

- тормозном

$$F = \frac{2k\Phi i_p}{D_{ш} \eta_{мех}} \cdot I. \quad (5)$$

По результатам экспериментов, порядок проведения которых изложен в работе [5], были построены диаграммы окружных усилий (сплошная линия, соответствующая проектной характеристике дороги) и токов (штрихпунктирная линия), представленные на рисунке 2.

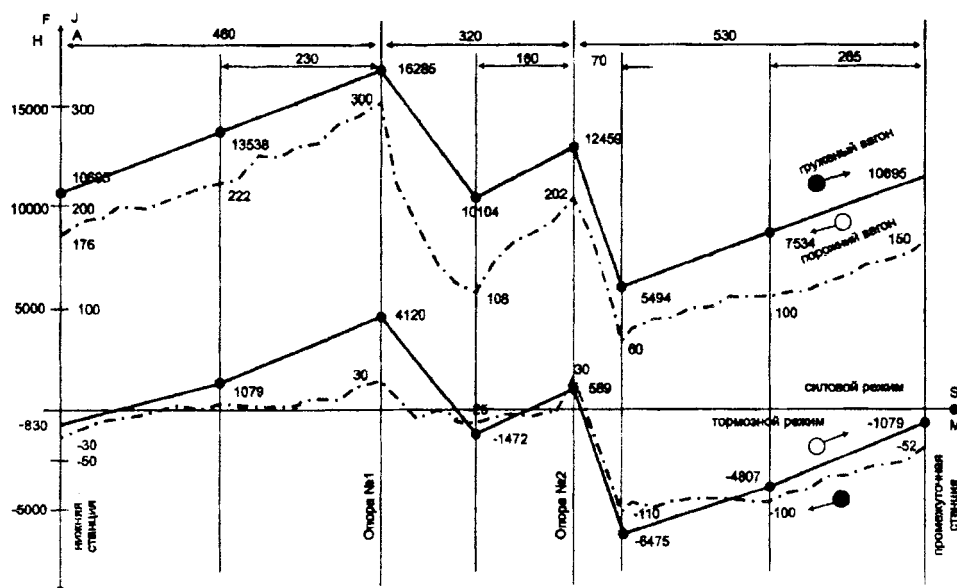


Рисунок 2 – Диаграммы окружных усилий и токов, полученные экспериментальным путем

Для построения диаграмм окружных усилий могут быть использованы математические модели, составленные на основании принципов модульной компоновки [7]. Такой подход является универсальным и позволяет получить зависимость окружного усилия привода от положения вагонов на трассе с учетом проектных характеристик и вносимых в процессе эксплуатации конструкционных изменений.

Для определения величины окружного усилия привода дороги необходимо моделировать встречное синхронное движение вагонов. Поскольку они связаны между собой посредством тягового каната, перемещение вагона с верхней станции к нижней (далее – верхний вагон) вдоль трассы  $s_v$  равно перемещению вагона с нижней станции к верхней (далее – нижний вагон)  $s_n$ . Положение вагона, движущегося вниз, определяет усилие в сбегавшей с приводного шкива ветви тягового каната  $T_{сб}$ , а положение вагона, движущегося вверх, – усилие в набегавшей на приводной шкив ветви тягового каната  $T_{нб}$ . Поэтому окружное усилие может быть определено по формуле:

$$F = T_{нб} - T_{сб}. \quad (6)$$

Согласно работе [8] после некоторых преобразований, учитывающих особенности конструкции привода, натяжения и закрепления

Составляющие натяжения ветвей тягового каната от собственного веса могут быть определены по формулам:

$$W_{\text{н}} = T_0 + q_{\text{т}}(h_{\text{с}} + f l_{\text{с}}); \quad (13)$$

$$W_{\text{в}} = T_0 - q_{\text{т}}(h_{\text{с}} + f l_{\text{с}}), \quad (14)$$

где  $T_0$  – рабочее усилие натяжного устройства, воспринимаемое одной ветвью каната;

$f = 0,0065$  – коэффициент сопротивления движению тягового каната [9];

$h_{\text{с}}$  – перепад высот по конечным станциям;

$l_{\text{с}}$  – длина дороги по горизонтали.

При составлении диаграмм окружных усилий были приняты такие характеристики дороги:

- профиль – согласно рисунку 1;
- полезная нагрузка  $P = 32$  кН (40 пассажиров по 80 кг);
- вес пустого вагона  $P_0 = 18$  кН;
- погонный вес несущего каната  $q_{\text{н}} = 0,1263$  кН/м (канат закрытый несущий по ГОСТ 7675-73 диаметром 47 мм);
- погонный вес тягового каната  $q_{\text{т}} = 0,01635$  кН/м (канат двойной свивки по ГОСТ 2688-80 диаметром 21 мм: диаметры головного и хвостового канатов принимаем равными);
- рабочее усилие натяжного устройства, воспринимаемое одной ветвью тягового каната,  $T_0 = 56,5 / 2$  кН (масса противовеса 5,65 т);
- длина каната на трассе  $L_{\text{к}} = 1342$  м (определена по рекомендациям [10], считая провисание каната в пролетах приблизительно одинаковым и равным 0,02 при отсутствии натяжного устройства).

Как видно из выражений (7), (8), (11), (12), натяжение ветвей тягового каната в значительной степени определяется формой кривой провисания несущего каната (влияет на угол подъема вагона посредством изменения горизонтальной составляющей натяжения  $H$ ) в конкретной точке расположения вагона в пролете, указываемой координатой  $x$  ( $x_{\text{н}}$  и  $x_{\text{в}}$  для нижнего и верхнего вагонов соответственно). Зависимость величины  $H$  от положения вагона в пролете может быть получена с помощью модульной математической модели, принципы составления которой изложены в работе [7]. Так, при перемещении вагона в первом пролете (считая от верхней станции) математическая модель имеет вид:

$$H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^H} = H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2^B} \cdot \exp \left( \mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_2^B - \operatorname{tg} \alpha_1^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_2^B \cdot \operatorname{tg} \alpha_1^H} \right);$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1^H = \operatorname{tg} \beta_1 - \frac{q_H l_1}{2H_1 \cos \beta_1} (1 + 2k_1 \delta_1);$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2^B = \operatorname{tg} \beta_2 + \frac{q_H l_2}{2H_2 \cos \beta_2}; \quad k_1 = \frac{P_B}{q_H l_1} \cos \beta_1;$$

$$H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2^H} = H_3 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_3^B} \cdot \exp \left( \mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_3^B - \operatorname{tg} \alpha_2^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_3^B \cdot \operatorname{tg} \alpha_2^H} \right);$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2^H = \operatorname{tg} \beta_2 - \frac{q_H l_2}{2H_2 \cos \beta_2}; \quad \operatorname{tg} \alpha_3^B = \operatorname{tg} \beta_3 + \frac{q_H l_3}{2H_3 \cos \beta_3};$$

$$L_K = \left[ \frac{l_1}{\cos \beta_1} + \frac{q_H^2 l_1^3 \cos \beta_1}{24H_1^2} (1 + 12\delta_1(1 - \delta_1)(k_1^2 + k_1)) \right] + \\ + \left[ \frac{l_2}{\cos \beta_2} + \frac{q_H^2 l_2^3 \cos \beta_2}{24H_2^2} \right] + \left[ \frac{l_3}{\cos \beta_3} + \frac{q_H^2 l_3^3 \cos \beta_3}{24H_3^2} \right].$$

Здесь  $k_1$  – коэффициент дополнительной нагрузки, учитывающий влияние сосредоточенной силы (веса вагона) на кривую провисания несущего каната;  $\delta_1 = x_1 / l_1$  – относительная координата, определяющая положение вагона в пролете (вагон расположен на расстоянии  $x_1$  от верхней опоры по горизонтали);  $H_1, H_2, H_3$  – горизонтальные составляющие натяжения несущего каната в первом, втором и третьем пролетах соответственно.

Полученные таким образом диаграммы окружных усилий привода представлены на рисунке 3.

Как видим, на каждом участке диаграммы, соответствующем конкретному пролету, имеет место погрешность моделирования (разность между теоретическим и экспериментальными значениями), что объясняется неточностью задания технических характеристик дороги (особенно длины каната на трассе  $L_K$ ) и пренебрежением малыми величинами. Однако, данная погрешность является систематической (разность теоретического и экспериментального значений окружного усилия в пределах одного пролета относительно стабильна) и, следовательно, может быть исключена после обработки большего объема статистического материала (сравнения диаграмм окружных усилий, полу-

ченных аналитически и экспериментально, для дорог с различными техническими характеристиками).

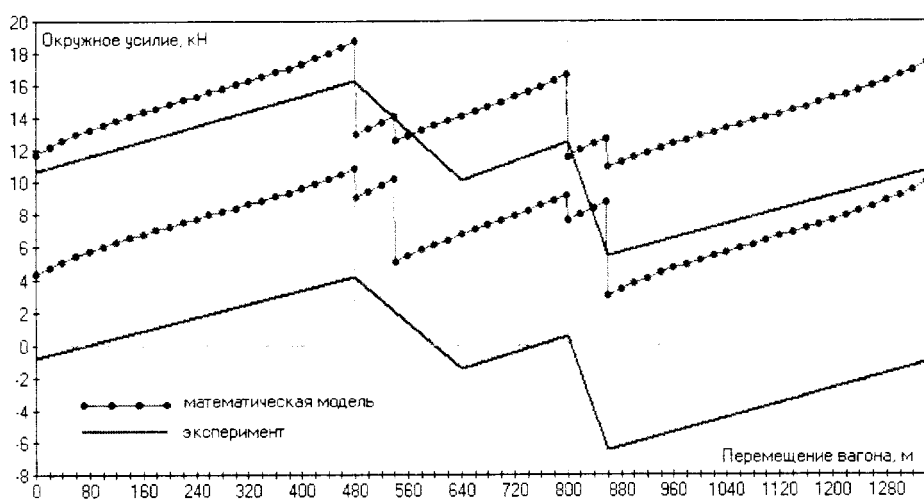


Рисунок 3 – Диаграммы окружных усилий привода

Особое внимание следует обратить на скачкообразное изменение окружного усилия при прохождении одним из вагонов (или обоими – в данной дороге такой вариант исключен вследствие особенностей профиля) опоры, что является характерным для канатных дорог всех типов [11]. Данное явление не отмечено на экспериментальных диаграммах окружных усилий и токов (рис. 2) ввиду некоторых особенностей регистрации изменения величины силы тока (имела место дискретность замеров, а не непрерывная запись).

Обобщая изложенное, можно сформулировать такие выводы:

- 1) на основании сравнения теоретических и экспериментальных диаграмм окружных усилий с проектными отмечаем возможность применения приведенных методик в инженерной практике; при этом математическая модель нуждается в уточнении с целью устранения систематических ошибок, а экспериментальная методика – в повышении точности измерений (при необходимости, определяемой целями построения диаграмм);
- 2) теоретическую методику построения диаграмм окружных усилий целесообразно использовать при проектировании новых и модернизации действующих дорог с целью оценки нагруженности элементов привода;
- 3) экспериментальную методику целесообразно использовать при диагностике технического состояния действующих дорог во время проведения ежегодных пуско-наладочных работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пірко, В. М. Експертиза канатних доріг: досвід, проблеми, перспективи / В. М. Пірко // Матеріали міжнародних науково-практичних

- конференций по подъемным сооружениям за 2005 год. Перспективы рынка лифтов, эскалаторов, канатных дорог в Украине (08-10.12.2005). – Одесса: Астропринт, 2006. – С. 212-215.
2. Лизанчук, С. Канатним дорогам – безпечний європейський підхід / С. Лизанчук // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2010. – № 8.
3. Кинжибалов, А. В. Повышение безопасности пассажирских канатных дорог на основе оценки риска и резервирования привода: автореферат дис. ... канд. техн. наук: защищена 26.12.08 / Кинжибалов Александр Владимирович. – Новочеркасск, 2008. – 24 с.
4. Мироненко, А. С. Неразрушающий контроль стальных канатов пассажирских канатных дорог / А. С. Мироненко, И. И. Шпаков // Монтажные и специальные работы в строительстве. Стальные конструкции. – 2007. – № 9. – С. 9-11.
5. Сванидзе, Л. Г. Окружные усилия на шкивах канатных дорог / Л. Г. Сванидзе, В. Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2008. – № 7. – С. 48-50.
6. Сванидзе, Л. Г. Размещение опор маятниковой канатной дороги / Л. Г. Сванидзе, В. Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2009. – № 4.
7. Горячев, Ю. К. Применение принципа модульной компоновки к математическому моделированию нагруженности несущего каната маятниковой подвесной дороги / Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник // Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава. – 2010. – № 2(27). – С. 205-214.
8. Беркман, М. Б. Подвесные канатные дороги / М. Б. Беркман [и др.]. – М.: Машиностроение. 1984. – 264 с.
9. Справочник проектировщика промышленного транспорта / под ред. А. С. Гельмана. – М.: Изд-во литературы по строительству. 1972. – 231 с.
10. Wire rope engineering handbook. US Steel Supply. – 82 p.
11. Дукельский, А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны / А. И. Дукельский. – М.-Л.: Машиностроение. 1966. – 483 с.