

УДК 625.574

Ракша С. В., Горячев Ю. К., Куропятник А. С.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНЫХ МАСС ПОДВЕСНОЙ КАНАТНОЙ ДОРОГИ НА СПЕКТР СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ПРИВОДА

В последнее время подвесные канатные дороги (ПКД) становятся все более распространенным видом транспорта как курортного, так и городского. Их использование позволяет рационально организовывать и перераспределять грузо- и пассажиропотоки с минимальными затратами на сооружение и эксплуатацию транспортных средств. Поэтому увеличение спроса на данный вид транспорта является вполне закономерным и подчеркивает необходимость проведения исследований с целью обеспечения надежности, безопасности и экономической целесообразности использования ПКД.

Подвесные канатные дороги являются сложными динамическими системами, воспринимающими множество нагрузок, различных по характеру, источнику возмущения и амплитудно-частотным параметрам. Поэтому в ходе исследований данных объектов следует уделить особое внимание резонансным явлениям, которые могут стать причиной возникновения аварийных ситуаций, таких как удары вагонов об опоры, захлестывание тягового каната, уход вагонов с несущих канатов или опорных башмаков и т. п. Учитывая особенности эксплуатации ПКД (перемещение грузов и пассажиров на существенном расстоянии от земли), задача обоснования рациональных параметров привода и дороги в целом на основании предупреждения и ограничения резонансных явлений особенно актуальна с точки зрения обеспечения безопасности перевозок.

Вопросы обоснования рациональных параметров привода и ПКД в целом рассматривались рядом ученых. Многие результаты исследований в данной области реализованы в «Правилах...» [1], некоторые – в виде рекомендаций к проектированию [2, 3, 4]. Тем не менее, большинство норм и рекомендаций основываются на расчетах по формулам статики, некоторые вовсе не имеют теоретического обоснования.

Исследованиям динамической нагруженности элементов ПКД посвящена работа [5], в которой рассматриваются динамические процессы в тяговых канатах. При этом учтены только поперечные колебания и не отмечено влияние указанных процессов на нагруженность элементов привода.

На важности применения комплексного подхода к оцениванию нагруженности элементов ПКД акцентируют внимание ученые разных стран [6–11]. Тем не менее, рекомендаций по определению рациональных параметров приводов ПКД на основании анализа спектра собственных частот обнаружено не было.

Подвесная канатная дорога является достаточно сложной системой с точки зрения математического моделирования динамики ее элементов. Она состоит из сосредоточенных масс и элементов с распределенными параметрами (рис. 1). Сосредоточенными массами можем считать ротор электродвигателя, массы деталей редуктора, шкив, вагоны и натяжной груз к тяговому канату (либо величину, характеризующую рабочее усилие натяжного устройства не весового действия). Несущий и тяговый канаты являются элементами с распределенными параметрами.

Особенности составления математической модели по такому принципу изложены в работе [12].

Целью данной работы является формирование рекомендаций по выбору рациональных значений инерционных и кинематических параметров подвесной канатной дороги на основании предупреждения резонансных явлений с учетом влияния подвижных масс ПКД на спектр собственных частот привода.

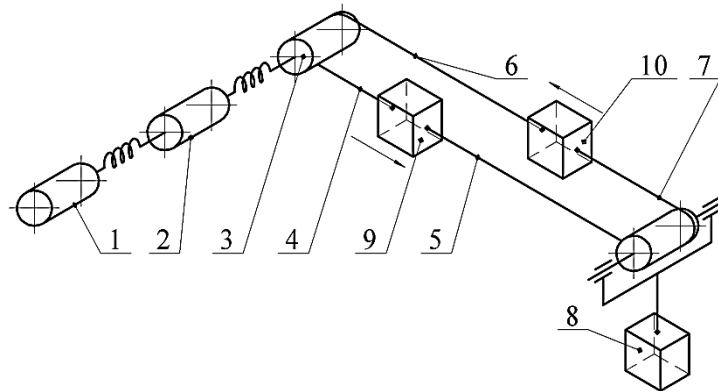


Рис. 1. Расчетная схема ПКД как системы сосредоточенных масс и элементов с распределенными параметрами:

1 – ротор двигателя; 2 – массы деталей редуктора, приведенные к выходному валу; 3 – шкив; 4–7 – отрезки тягового каната; 8 – натяжной груз; 9, 10 – вагоны

Ряд подвижных масс, подлежащих учету в пределах данной работы, позволяет выделить следующие задачи исследования:

- 1) оценка влияния масс вагонов на спектр собственных частот привода;
- 2) оценка влияния массы шкива на спектр собственных частот привода;
- 3) оценка влияния массы натяжного груза к тяговому канату на спектр собственных частот привода;
- 4) формирование общих рекомендаций по выбору рациональных параметров привода и ПКД в целом.

Для упрощения дальнейшего представления материала исследований введем следующие определения:

- верхний вагон – вагон, движущийся от верхней приводной станции к нижней натяжной;
- нижний вагон – вагон, движущийся от нижней натяжной станции к верхней приводной;
- масса вагона – суммарная масса пустого вагона и находящихся в нем пассажиров;
- масса шкива – суммарная масса всех элементов привода, приведенная к тяговому шкиву;
- масса натяжного груза – величина, характеризующая рабочее усилие натяжного устройства к тяговому канату (не зависимо от типа устройства).

Все приведенные ниже результаты получены на основе анализа спектра собственных частот привода подвесной канатной дороги маятникового типа «Мисхор – Ай-Петри» (нижний участок, рис. 2) с такими параметрами:

- масса вагона $m = 5\,000$ кг;
- масса пустого вагона $m_0 = 1\,800$ кг;
- масса шкива $m_3 = 5\,000$ кг;
- масса натяжного груза $m_6 = 5\,650$ кг;
- суммарная длина тягового каната в пролетах между станциями $l = 1\,300$ м;
- диаметр тягового шкива $D = 3$ м.

Влияние масс вагонов

Влияние масс вагонов на спектр собственных частот привода имеет первостепенное значение при обосновании рациональных значений скорости движения.

Скорость движения вагонов определяется по формуле:

$$v = \omega \frac{D}{2},$$

где ω – угловая скорость (частота) вращения шкива;

D – диаметр тягового шкива.

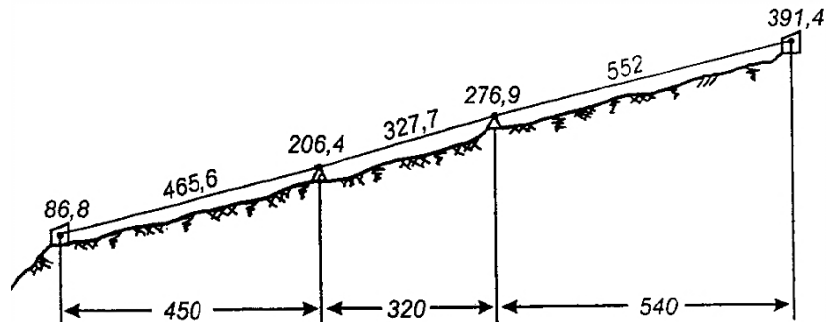


Рис. 2. Профиль исследуемой ПКД

Согласно «Правилам...» [1] максимально допустимая скорость движения вагонов в пролетах составляет 12,5 м/с. Учитывая диаметр шкива исследуемой дороги, устанавливаем максимально допустимую частоту вращения шкива – $8,33 \text{ с}^{-1}$. Проведенные исследования показали, что в диапазон $0 \dots 8,33 \text{ с}^{-1}$ попадают лишь первые три собственные частоты привода [12], поэтому здесь и далее более высокие частоты не рассматриваются.

Одной из особенностей влияния масс вагонов на спектр собственных частот привода является их перемещение в процессе работы дороги, что обуславливает различные жесткости отрезков тягового каната, соединяющих массы m_3 , m_4 , m_5 и m_6 между собой (рис. 3).

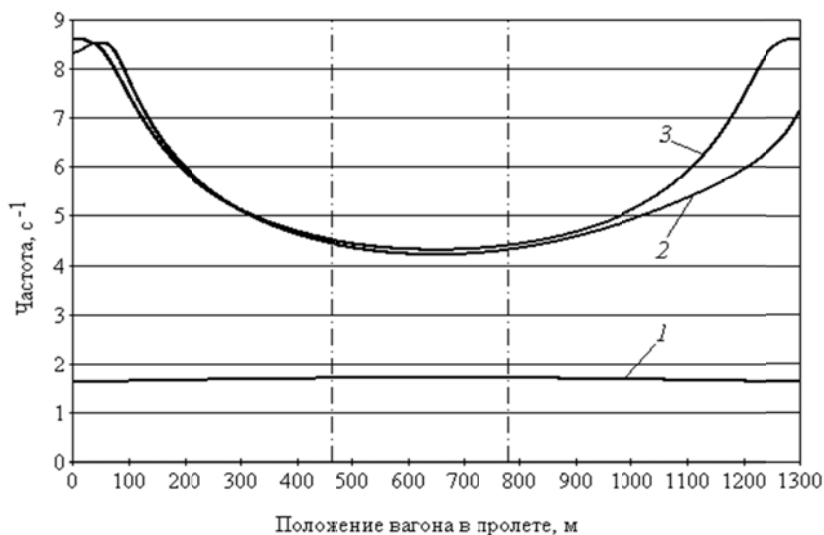


Рис. 3. Зависимость собственных частот привода от положения вагонов на трассе:
1 – первая частота; 2 – вторая частота; 3 – третья частота

Другим ключевым аспектом является неравномерность загрузки вагонов, которая характеризуется отношением массы верхнего вагона к массе нижнего и определяется количеством пассажиров в каждом из вагонов (рис. 4).

На рис. 4 показана зависимость первых двух частот привода от неравномерности загрузки вагонов (третья частота не показана, поскольку движение со скоростью, определяемой диапазоном между второй и третьей частотами, крайне нежелательно ввиду близости указанных частот, а значит, перекрывания околорезонансных, аварийно опасных зон).

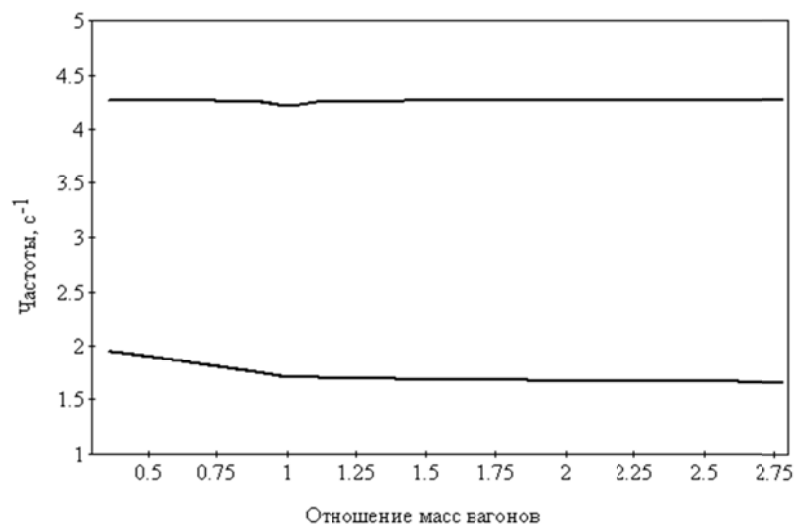


Рис. 4. Зависимость собственных частот привода от неравномерности загрузки вагонов

Как видим, недогрузка верхнего вагона обуславливает повышение первой частоты, что негативно сказывается на процессе пуска привода и дальнейшего выхода на скорость установившегося движения (на высоких частотах амплитуда резонанса больше, а, следовательно, необходимо больше энергии на преодоление околорезонансной зоны).

Анализируя спектр собственных частот привода при различной загрузке вагонов, можно рекомендовать диапазон рациональных значений частоты вращения шкива привода из условия отсутствия резонанса при установившемся движении (рис. 5).

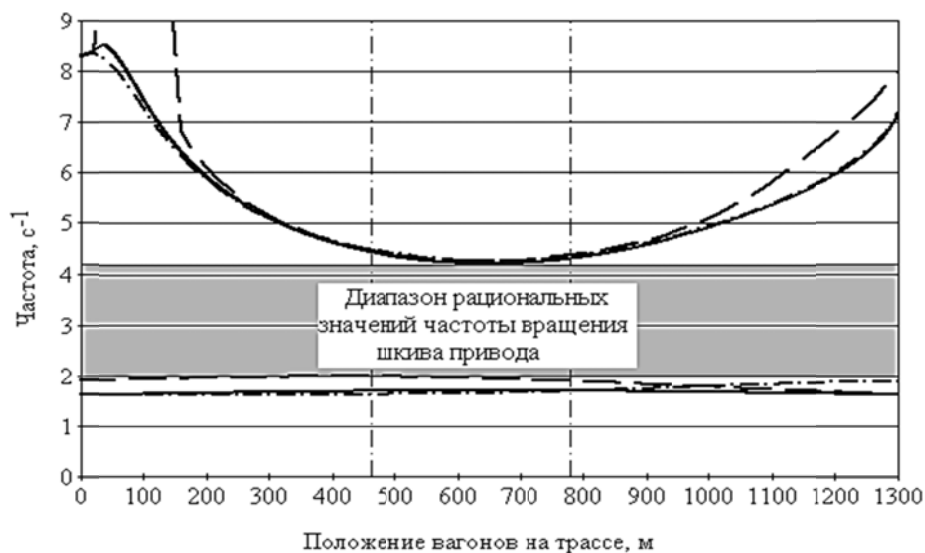


Рис. 5. Зависимость собственных частот привода от положения вагонов на трассе при различной загрузке вагонов:

— — — — — равная загрузка; — — — — — верхний вагон пустой; — · — · — — нижний вагон пустой

Влияние массы шкива

Анализируя зависимость собственных частот привода от массы шкива (рис. 6), отмечаем наличие так называемого критического значения массы, характеризующегося равенством второй и третьей собственных частот привода. В случае превышения этого значения необходимо снижать максимально допустимую скорость движения вагонов, что негативно сказывается на пропускной способности дороги. При этом с увеличением массы шкива

снижается первая собственная частота, что благоприятно сказывается на процессе пуска привода и дальнейшего выхода на скорость установившегося движения (в отличие от недогрузки вагона, описанной выше).

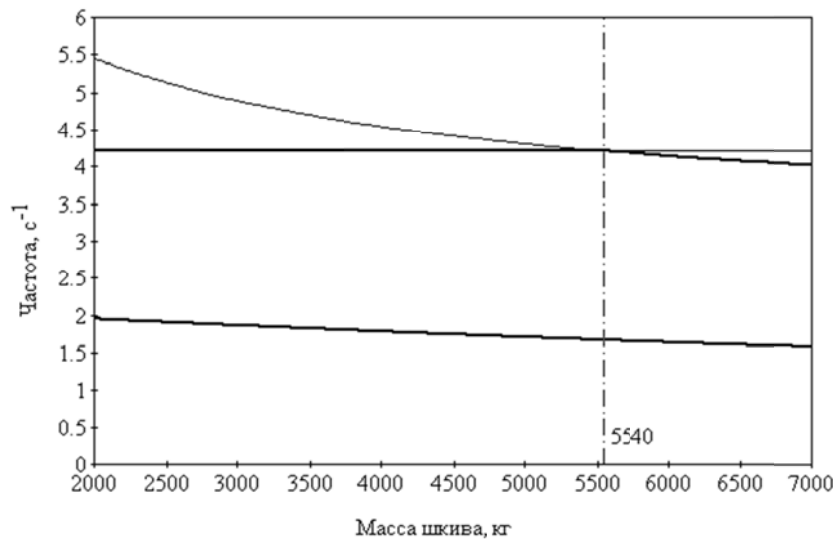


Рис. 6. Зависимость собственных частот привода от массы шкива

Следует иметь ввиду, что масса шкива как величина является суммой масс всех элементов привода, приведенных к тяговому шкиву, а значит, может корректироваться не только за счет массы тягового шкива, но и путем изменения других масс, а также передаточного числа привода.

Влияние массы натяжного груза

Анализируя зависимость собственных частот привода от массы натяжного груза (рис. 7), отмечаем наличие критического значения массы, суть которого описана выше. Однако в отличие от процедуры изменения массы шкива, при изменении массы натяжного груза (эквивалента рабочего усилия натяжного устройства) первая собственная частота остается постоянной.

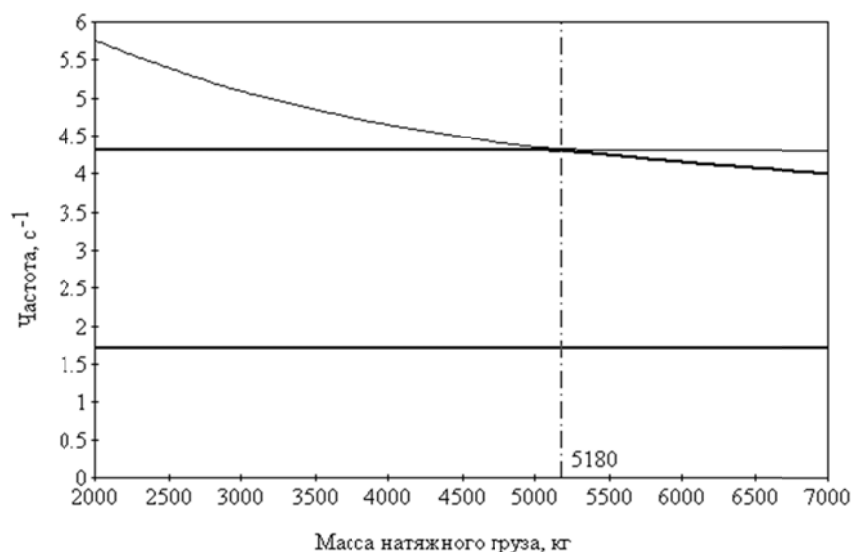


Рис. 7. Зависимость собственных частот привода от массы натяжного груза

ВЫВОДЫ

При реализации системы управления движением вагонов рассматриваемой дороги и особенно – при проектировании новых аналогичной конструкции рекомендуется принимать частоту вращения тягового шкива в пределах $2,0 \dots 4,2 \text{ с}^{-1}$, что соответствует скорости установившегося движения вагонов $3,0 \dots 6,3 \text{ м/с}$. В случае необходимости замедления и последующего прохождения опор рекомендуется не сбавлять скорость ниже 3 м/с во избежание резонанса по первой собственной частоте привода.

Перед пуском дороги рекомендуется согласовать загрузку вагонов таким образом, чтобы в верхнем вагоне было не меньше пассажиров, чем в нижнем, что обеспечит снижение динамических нагрузок при прохождении околорезонансной зоны первой собственной частоты в период пуска привода и дальнейшего выхода на скорость установившегося движения.

При проектировании дорог, аналогичных рассмотренной в данной работе, рекомендуется обеспечить массу шкива (как сумму масс всех элементов привода, приведенных к тяговому шкиву, с учетом передаточного числа привода), не превышающую $5\,500 \text{ кг}$ за счет согласования соответствующих инерционных и кинематических параметров.

При проектировании дорог, аналогичных рассмотренной в данной работе, рекомендуется обеспечить массу натяжного груза к тяговому канату (как эквивалента рабочего усилия натяжного устройства), не превышающую $5\,200 \text{ кг}$.

Перспективными направлениями дальнейших исследований можно считать поиск и обоснование диапазонов рациональных значений инерционных параметров ПКД (массы шкива, массы натяжного груза).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог (ППКД) [Текст]. – М. : Металлургия, 1975. – 56 с.
2. Беркман М. Б. Подвесные канатные дороги [Текст] / М. Б. Беркман [и др.]. – М. : Машиностроение, 1984. – 264 с.
3. Дукельский А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны [Текст] / А. И. Дукельский. – М.–Л. : Машиностроение, 1966. – 484 с.
4. Машины непрерывного транспорта [Текст] / под ред. В. И. Плавинского. – М. : Машиностроение, 1969. – 720 с.
5. Патарая Д. И. Расчет и проектирование канатных систем на примере подвесных дорог [Текст] / Д. И. Патарая. – Тбилиси : Мецниереба, 1991. – 103 с.
6. Nejez J. Cableway oscillation problems [Text] / J. Nejez // International Ropeway Review. – 2011. – № 6. – P. 47.
7. Kopanakis G. A. Oscillations in ropeways. Part 1 [Text] / G. A. Kopanakis // International Ropeway Review. – 2011. – № 6. – P. 48–50.
8. Kopanakis G. A. Oscillations in ropeways. Part 2, 3 [Text] / G. A. Kopanakis // International Ropeway Review. – 2012. – № 1. – P. 46–49.
9. Kopanakis G. A. Oscillations in ropeways. Part 4 [Text] / G. A. Kopanakis // International Ropeway Review. – 2012. – № 3. – P. 63–66.
10. Kowal J. Static and dynamic analysis of the cableway [Text] / J. Kowal [etc.] // The Archive of Mechanical Engineering. – 2008. – Vol. LV. – № 4. – P. 357–368.
11. Knawa M. Effect of dynamic loads acting on carrying cable in operating ropeway [Text] / M. Knawa, D. Bryja // Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. – 2008.
12. Ракиш С. В. Анализ спектра власних частот привоу підвісної канатної дороги [Текст] / С. В. Ракиш, Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // Строительство. Материаловедение. Машиностроение : сб. науч. тр. – № 66. – С. 249–256.

Статья поступила в редакцию 18.06.2013 г.