

УДК 629.4: 629.12

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

д.т.н., проф. Беликов А.С., Улитин М.Ю. , к.т.н., с.н.с. Голендер В.А.* ,
Долгополова Н.В.* , к.т.н., доц. Капленко Г.Г.*

ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

** Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины,
г. Харьков*

Постановка проблемы. В условиях интенсивного развития городов и промышленных центров перед строительной индустрией возникла двуединая задача: первое – эффективное применение современных грузоподъемных машин для проведения ремонтно-строительных, аварийно-восстановительных, а также аварийно-спасательных работ в высотных зданиях и зданиях повышенной этажности; второе – обеспечение их безопасного использования, в том числе при чрезвычайных ситуациях.

Башенные конструкции подъемно-транспортных машин (в дальнейшем «объекты»), в рабочем состоянии характеризуются относительно большой высотой, достигающей высоты от 30 до 55 метров, и в то же время – малой площадью опирания нижней части их конструкции (ходовая часть или, иначе, портал). Это обуславливает высокое расположение суммарного центра тяжести на геометрии контура всего объекта. При изготовлении подобных изделий машиностроения за рубежом, как правило, используют облегченные конструкции со сравнительно малой изгибной (EI) жесткостью соединительных звеньев, что сопряжено с относительно большими деформациями и перемещениями элементов объекта в процессе его задействования. При штатных режимах работы силовых механизмов (например, на «подъем» или на «спуск») здесь могут возникать существенные механические колебания элементов конструкции. Это, в свою очередь, увеличивает вероятность потери устойчивости, т.е. опрокидывания объекта, что связано с повышенной опасностью для обслуживающего персонала и даже с травматизмом и смертностью людей, находящихся в рабочей зоне. Кроме того, слабое демпфирование (затухание упругих колебаний), после прекращения и во время действия внешних возмущений, сопряжено с вредным физиологическим воздействием на оператора (крановщика), а также неблагоприятно сказывается на работоспособность самого объекта. Для подтверждения актуальности данных исследований достаточно привести примеры резонансных случаев падения башенных кранов в Киеве и в Харькове в текущем году.

Цель статьи. Существующие методы расчета недостаточно строго учитывают динамику процессов, которая возникает в колеблющемся объекте, поскольку ранее эти методы разрабатывались, главным образом, для не габаритных по высоте конструкций, но со значительной жесткостью составляющих ее элементов. Это автоподъемники, автолестницы, башенные краны и

др. Новейшие конструкции объектов, используемых для строительства и обслуживания высотных зданий и зданий повышенной этажности, существенно отличаются от своих предшественников по параметрам собственного веса и жесткости (податливости) соединительных элементов. Потому их проектирование требует более точные, и одновременно надежные инженерные методы расчета, обеспечивающих безопасность их эксплуатации с точки зрения охраны труда.

Анализ последних исследований и публикаций. Исторически впервые вопрос устойчивости подобных объектов был рассмотрен в работе Е. А. Вышнеградского [1]. Представленный в ней метод расчета устойчивости был основан на классических положениях механики, которые определяют устойчивость твердого тела как отношение момента восстанавливающих сил к опрокидывающему моменту. Автором, при вычислении восстанавливающего и опрокидывающего моментов, учитывались только силы статики, действующие на объект. Полагалось, что динамические явления здесь не играют существенной роли, и они не принимались во внимание. Для вычислений восстанавливающего и опрокидывающего моментов в расчеты вводились силы, создающие моменты относительно так называемых ребер опрокидывания. В последующие годы появились работы [2-7], посвященные устойчивости таких машин, как грузовые краны. Однако они не внесли ничего кардинально нового в упомянутый способ учета нагрузок, действующих на конструкцию объекта во время его работы.

Вопрос учета влияния динамических процессов на устойчивость объектов значительной высоты был впервые рассмотрен в работе [8]. В ней предлагалось учитывать динамические нагрузки, возникающие при перемещениях полезного груза, с помощью уточняющего коэффициента, на который следует умножать в расчетах реальную (исходную) величину этого груза. Автор указал на необходимость определять значение такого коэффициента путем экспериментальных исследований. Однако не привел конкретных данных о его значениях. Н.Н. Емцовым [9] тоже указывалось на необходимость учитывать влияние динамики, возникающей в неустановившихся режимах работы механизмов подъемно-транспортных машин, на устойчивость исследуемых объектов. Им определялись искомые динамические добавки к статическим нагрузкам при рассмотрении работы подъемного крана с грузом как абсолютно жесткого тела в предположении, что рабочие механизмы разгоняются (замедляются) с постоянным ускорением, т.е. – квазистатически. В работе [10] приведены данные о несколько уточненных исследованиях устойчивости башенных кранов. В ней отмечается, что степень защищенности рассматриваемых объектов от опрокидывания в их рабочих режимах определяется специальным коэффициентом S_r , отнесенным к грузоподъемности Q , как отношение суммы моментов всех нагрузок, возникающих в конкретном случае относительно лимитирующего ребра опрокидывания, к моменту веса груза относительно того же самого ребра.

В настоящее время во многих странах мира в основу практических расчетов по стандартам положен критерий, согласно которому требуется не допустить обезгруживания опорных ходовых колес, т.е. обеспечить положительность сил давления колес крана на рельсы пути (или аутригеров автоподъемников/автолестниц на дорожное покрытие). В связи с этим, для определения расчетным путем таких нагрузок следует вводить соответствующие коэффициенты безопасности.

Изложение основного материала. Традиционный способ определения сил инерции в рассматриваемых исследованиях устойчивости вызывает определенные сомнения, так же как и отнесение всех расчетов к опасному состоянию объекта, в качестве которого принимается снижение до нуля давления от колес/аутригеров на основание («обезгруживание колес»). Известно, что даже в случае, когда это давление действительно достигает нулевого значения, объект не обязательно потеряет устойчивость. Может наступить некоторый отрыв колес от основания (рельсы/грунт), и, тем не менее, кран/автокран не опрокидывается. И наоборот, обезгруживание опорных элементов (колеса или аутригеры) в определенный момент времени еще не достигнуто, а объект потенциально (с последующим развитием колебательных процессов) подвержен опрокидыванию. Отсюда следует вывод, что корректирующие коэффициенты безопасности нужно соотносить к действительному состоянию потери устойчивости, которое следует устанавливать достоверно корректными исследованиями.

В теории колебаний [11] в части раздела «устойчивость» детально рассмотрены колебательные процессы специального вида. Например, для устойчивых колебаний треугольной формы [12] характерен фазовый портрет вида рис. 1

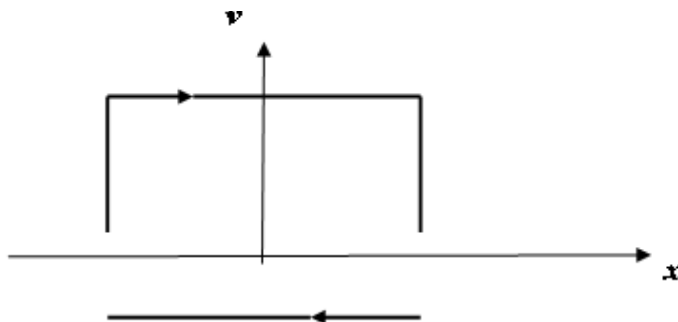


Рис. 1. Фазовая траектория незатухающих устойчивых треугольных колебаний: x – координата линейного осциллятора; v – его скорость

В условиях отсутствия действия сил демпфирования в динамической системе (затухающие колебания) фазовым траекториям присуще наличие особых точек (седловые точки). В качестве них может выступать начало координат, как, например, на рис. 2, где через особую точку $(0, 0)$ проходят две вырожденные фазовые траектории (сепаратрисы).

Остальные траектории похожи на гиперболы. Особая точка такого типа соответствует безразличному (критическому) положению равновесия осциллятора, а значит и исследуемой модели объекта.

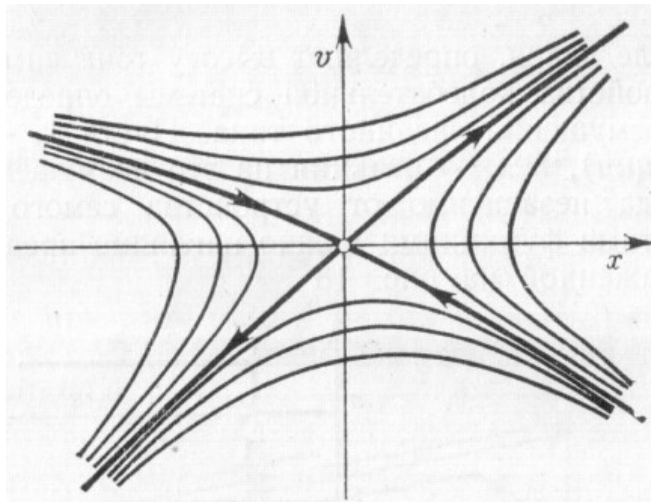


Рис. 2. Фазовый портрет с особой точкой $(0; 0)$ типа седла

Подход к определению устойчивого положения равновесия для рассматриваемых в диссертации объектов можно позаимствовать из несложного примера, приведенного в работах [13 и 14]. Здесь рассматривается симметричная относительно фронтальной плоскости конструкция объекта в виде параллелепипеда (башня), расположенного на плоском недеформируемом горизонтальном основании, по которому не допускается проскальзывание, но возможны колебания (качания) башни – повороты относительно своих ребер опрокидывания, расположенных на абсолютно жестком основании (рис. 3).

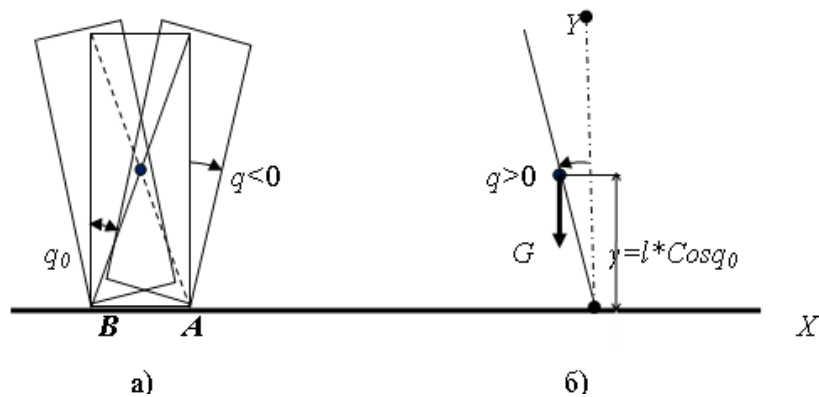


Рис. 3. Упрощённая схема (а) и модель (б) колебаний звена объекта относительно своих ребер опрокидывания

Ограничимся рассмотрением движения, в котором две боковые грани башни, параллельные плоскости рисунка, остаются в этих своих вертикальных плоскостях. Тогда положение башни можно определить углом q , который заключен между боковой гранью отклоняющейся башни и вертикальными осями, проходящими через точки A и B .

Введем обозначения:

$2l$ – длина диагонали прямоугольника (грани рассматриваемого параллелепипеда);

q_0 – накрест лежащий плоский угол у основания параллелепипеда башни между его вертикалью и диагональю, как показано на рис. 1;

G – вес всей башни;

γ – радиус инерции башни относительно точек A и B .

Уравнения движения башни запишутся в следующем виде:

- при повороте относительно ребра A

$$(G/g)\gamma^2 \ddot{q} - G\sin(q_0 + q) = 0, \text{ для } -\pi/2 < q < 0, \quad (1)$$

- при повороте относительно ребра B

$$(G/g)\gamma^2 \ddot{q} + G\sin(q_0 - q) = 0, \text{ для } 0 < q < \pi/2; \quad (2)$$

с учетом начальных условий

$$\ddot{q} = 0, \quad q = q_m - \text{начальные условия} \quad (3)$$

Что касается начальных условий (3). Они выбраны так, что абсолютное приращение обобщенной координаты q позволяет установить то предельное значение q_m , которое является граничным для допустимого отклонения объекта от вертикали (ось Y), при котором еще возможно его возвращение в положение устойчивого равновесия. Семейство решений уравнений (1) и (2) на фазовой плоскости, отвечающие симбиозу траекторий рис 1 и рис. 2 представлены на рис 4. (Фазовая плоскость, как и на рис. 2, образована фазовыми координатами q и \dot{q} .) Причем, здесь имеем две седловые точки с координатами: $(-q_0, 0)$ и $(q_0, 0)$. Через них, как видно из рисунка, проходят соответственно две сепаратрисы, которые, пересекаясь с осью $v \equiv \dot{q}$ своими частями, образуют область устойчивых колебаний, границей которой является ромб подобно прямоугольнику на рис. 1. Вне этой области колебания являются неустойчивыми т.к. координаты q и \dot{q} устремляются в бесконечность с течением времени.

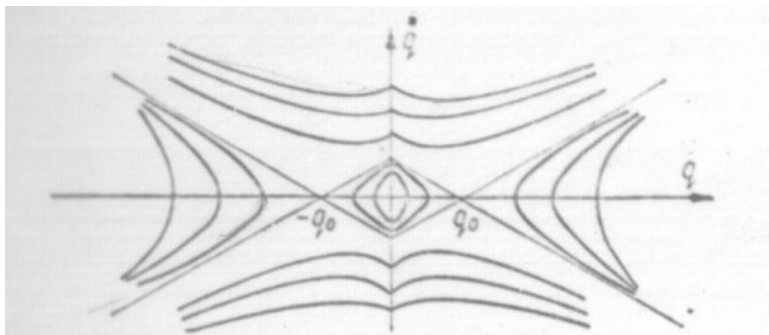


Рис. 4. Вид решения уравнений (1) и (2) в фазовых координатах

Аналогичные явления будут происходить и в исследуемых объектах. Таким образом, для оценки безопасности работы современных конструкций подъемно-транспортных машин, используемых для строительства и обслуживания высотных зданий и зданий повышенной этажности, следует корректно определять границы динамической устойчивости колебаний объекта, опирающегося ходовыми колесами или аутригерами на соответствующее основание. При этом следует задавать различные начальные условия, вне факта, ожидаемого по соображениям статики/квасистатики, отрыва одной из пар колес или аутригеров. В таких гипотетических случаях объект может коле-

баться попеременно около одного из ребер опрокидывания так же, как и относительно другого. Следовательно, требуется составлять дифференциальные уравнения колебаний системы для двух направлений движения относительно ребра *A* и ребра *B*. И уже на их основании проверять возрастают, уменьшаются или же остаются неизменными амплитуды колебаний сосредоточенных масс. В первом случае система будет неустойчива, в двух других – устойчива.

Выводы.

1. В данной работе сформулирована задача определения предельных отклонений объектов, превышение которых приводит к потере общей устойчивости системы, т.е. к опрокидыванию.

2. Исследовано состояние вопроса и проведен аналитический обзор работ по устойчивости рассматриваемых объектов. Доказана актуальность темы исследований.

3. Приведены обобщающие модели и рассмотрены качественные решения задач об устойчивости систем с демпфированием и без него.

Использованная литература

1. Е.А. Вышнеградский. Курс подъемных машин. Часть 1. СПб, 1885.
2. А.Е. Александрич, Е.Д. Соколов. Передвижные краны в строительстве. ОНТИ, 1933.
3. Г. Бэтман. Грузоподъемные машины. ОНТИ, 1933.
4. Р. Крелль. Проектирование кранов. ОНТИ НКТП, 1936.
5. R. Kirk. Counterbalances for Locomotive Cranes. American Machinist, 1902.
6. R. Krell. Standfestigkeit und stützdrucke von Kranen. Fördertechnik, №№ 8,9,11, 1917.
7. E. Recknagel. Standfestigkeit und Raddruck fahrbaren Drehkrane. Fördertechnik und Frachtverkehr, № 22, 1926.
8. E.G. Fiegehen. The Standardization of Crane Essentials. The Engineer, №№ 3623, 3649, 1925.
9. Н.Н. Емцов. Портовые и судовые грузоподъемные машины. Гострансиздат, 1937.
10. И.Я. Коган. Устойчивость строительных башенных кранов. Сб. трудов «Исследования строительных машин». Труды ВНИИСДМ, вып. 12 – М.: 1956. – С. 13-16.
11. А.А. Яблонский. Курс теории колебаний. М.: Высшая школа, 1966. – 255 с.
12. К. Магнус. Колебания. Пер. С нем. – М.: Мир, 1982. – 304 с.
13. H. Kauderer. Nichtlineare Mechanik. Berlin, 1958.
14. W. Bogusz. Statecznosc ukladow nieliniowych. PWN, Warszawa, 1967.