

УДК 69.05:658.382

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

БЕЛИКОВ А. С.¹, д. т. н., проф.,
ДОЛГОПОЛОВА Н. В.²; к. т. н.,
ШАЛОМОВ В. А.³, к. т. н., доц.,
УЛИТИНА М. Ю.^{4*}, соиск.

¹ Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, г. Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Отдел прочности и оптимизации конструкций, Институт проблем машиностроения имени А. Н. Подгорного НАН Украины, ул. Пожарского 2/10, г. Харьков, 61046, Украина, тел. +38 (050) 632-08-00, e-mail: n_dolgopolova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4326-2284

³ Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, г. Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: shalomov_v_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

^{4*} Департамент науки и образования Харьковской областной государственной администрации, г. Харьков, 61046, Украина, тел. +38 (057) 705-03-14 e-mail: m_ulitina@ro.ru, ORCID ID: 0000-0001-9678-6842

Аннотация. Постановка проблемы. Повышение безопасности ведения работ с применением подъемно-транспортного оборудования. **Методика.** При проведении исследований потери устойчивости конструкций подъемно-транспортных машин рассмотрены обобщенные уравнения вибрации и динамической устойчивости прикладной механики с применением современных методов математической обработки полученных результатов на ЭВМ. **Результаты.** 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 ауригеров автоподъемников / автолестниц на дорожное покрытие). В связи с этим, для определения расчетным путем таких нагрузок следует вводить соответствующие коэффициенты безопасности. 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 / ауригеров на основании («обезгруживание колес»). Когда это давление действительно достигает нулевого значения, объект не обязательно потеряет устойчивость. Может наступить некоторый отрыв колес от основания (рельсы / грунт земли) и, тем не менее, кран / автокран не опрокидывается. И наоборот, – обезгруживание опорных элементов (колеса или ауригеры) в определенный момент времени еще не достигнуто, а объект потенциально (с последующим развитием колебательных процессов) подвержен опрокидыванию. Следовательно, корректирующие коэффициенты безопасности необходимо соотносить к действительному состоянию потери устойчивости, которое следует устанавливать достоверно корректными исследованиями. **Научная новизна.** К предложенным авторами обобщенным уравнениям составлены уравнения вибраций и динамической устойчивости конструкции объекта относительно естественных ребер опрокидывания. **Практическая значимость.** Получаемые системы дифференциальных уравнений могут быть и линейными и нелинейными. Эти уравнения решаются с привлечением современных методов компьютеризированной прикладной механики и вполне допускают интерпретации на простейших аналоговых вычислительных машинах типа МН-7 как решение задач теории колебаний и теории устойчивости. Найденные при этом фазовые траектории позволяют в пределах инженерной точности определить такие критические условия, при которых объект исследований теряет устойчивость, связанную с его опрокидыванием.

Ключевые слова: потеря устойчивости; подъемно-транспортные машины; аварийно-восстановительные работы; сепаратриса; опорные элементы машин; теория колебаний

ДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ ПІДЪОМНО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН І ОБЛАДНАННЯ

БЕЛІКОВ А. С.¹, д. т. н., проф.,
ДОЛГОПОЛОВА Н. В.²; к. т. н.,
ШАЛОМОВ В. А.³, к. т. н., доц.,
УЛІТИНА М. Ю.^{4*}, здобувач

¹ Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, м. Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Відділ міцності та оптимізації конструкцій, Інститут проблем машинобудування імені А. М. Підгорного НАН України, вул. Пожарського 2/10, м. Харків, 61046, Україна, тел. +38 (050) 632-08-00, e-mail: n_dolgoplova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4326-2284

³ Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, м. Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: shalomov_v_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

^{4*} Департамент науки та освіти Харківської обласної державної адміністрації, м. Харків, 61046, Україна, тел. +38 (057) 705-03-14, e-mail: m_ulitina@ro.ru, ORCID ID: 0000-0001-9678-6842

Анотація. Постановка проблеми. Підвищення безпеки ведення робіт із застосуванням підйомно-транспортного устаткування. **Методика.** Під час проведення досліджень втрати стійкості конструкцій підйомно-транспортних машин розглянуто узагальнені рівняння вібрації і динамічної стійкості прикладної механіки із застосуванням сучасних методів математичної обробки отриманих результатів на ЕОМ. **Результати.** Наразі в багатьох країнах світу в основу практичних розрахунків за стандартами покладено критерій, згідно з яким потрібно не допустити зневантаження опорних ходових коліс, тобто забезпечити позитивність сил тиску коліс крана на рейки шляху (або аутригерів автопідйомників / автодрабин на дорожнє покриття). У зв'язку з цим, для визначення розрахунковим шляхом таких навантажень слід увести відповідні коефіцієнти безпеки. Традиційний спосіб визначення сил інерції в розглянутих дослідженнях стійкості викликає певні сумніви, так само як і віднесення всіх розрахунків до небезпечного стану об'єкта, за який приймається зниження до нуля тиску від коліс / аутригерів на підставу («зневантаження коліс»). Коли цей тиск справді досягає нульового значення, об'єкт не обов'язково втратить стійкість. Може відбутися деякий відрив коліс від основи (рейки / ґрунт землі), і все ж кран / автокран не перекидається. І, навпаки, зневантаження опорних елементів (колеса або аутригери) в певний момент часу ще не досягнуто, а об'єкт потенційно (з подальшим розвитком коливальних процесів) схильний до перекидання. Отже, коригувальні коефіцієнти безпеки необхідно співвідносити до дійсного стану втрати стійкості, яку слід установлювати достовірно коректними дослідженнями. **Наукова новизна.** До запропонованих авторами узагальнених рівнянь, складено рівняння вібрації і динамічної стійкості конструкції об'єкта щодо природних ребер перекидання. **Практична значимість.** Отримувані системи диференціальних рівнянь можуть бути і лінійними і нелінійними. Ці рівняння розв'язуються із залученням сучасних методів комп'ютеризованої прикладної механіки і цілком допускають інтерпретації на найпростіших аналогових обчислювальних машинах типу МН-7, як розв'язки задач теорії коливань і теорії стійкості. Знайдені при цьому фазові траєкторії дозволяють у межах інженерної точності визначити такі критичні умови, за яких об'єкт досліджень втрачає стійкість, пов'язану з його перекиданням.

Ключові слова: втрата стійкості; підйомно-транспортні машини; аварійно-відновлювальні роботи; сепаратриса; опорні елементи машин; теорія коливань

TO THE PROBLEM OF INCREASING SAFETY WHEN WORKING OF LIFTING AND TRANSPORT MACHINERY AND EQUIPMENT

BELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
DOLHOPOLOVA N.V.²; *Cand. Sc. (Tech.)*,
SHALOMOV V.A.³; *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
ULITINA M.Yu.^{4*}, *competitor*

¹ Department of Life Safety, State Higher Education Establishment "Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture", Chernyshevskogo str., 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² The A.N. Podgorny's Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10 Pozharsky st., Kharkiv, 61046, Ukraine, tel. +38 (050) 632-08-00, e-mail: n_dolgoplova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4326-2284

³ Department of Life Safety, State Higher Education Establishment "Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture", Chernyshevskogo str., 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: shalomov_v_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

^{4*} Department of science and education of Harkiv regional state administration, Harkiv, 61046, Ukraine, tel. +38 (057) 705-03-14, e-mail: m_ulitina@ro.ru, ORCID ID: 0000-0001-9678-6842

Abstract. Purpose. The safety increasing of work using the lifting and handling equipment. **Method.** During the resistance loss research of handling machinery structures were considered generalized equations of vibration and dynamic stability of the applied mechanics using modern mathematical processing methods obtained results on a computer. **Results.** Currently, in many countries as a basis for practical calculations standards on the criteria according to which you want to avoid the lack of load bearing running wheels, that is to provide a positive pressure forces the crane wheels in the way of the rails (or outrigger lifters / ladders on the pavement). Therefore, by calculation to determine such loads it is administered to input safety factors. The traditional method of determining the inertia forces in these studies stability is questionable, as well as the allocation of payments to a dangerous state of the object, which is adopted as a reduction to zero pressure of the wheel / outriggers on the base ("lack of load wheels"). When this pressure is really reaches zero, the object is not necessarily to lose its stability. There may come a certain detachment from the ground wheels (rail / earth ground), and, nevertheless, the crane / truck crane is not overturned. And vice versa – the lack of load

bearing elements (or outrigger wheels) at a given time is not yet reached, and potentially object (with the subsequent development of oscillatory processes) exposed to rollover. Consequently, corrective safety factors must be weighed to the actual state of resistance loss, which should be installed reliably correct research. *Scientific novelty*. To the author proposed generalized equation, it were made vibrations and dynamic stability equations of the object structure relative to the natural tipping edges. *Practical meaningfulness*. The resulting system of differential equations can be linear or nonlinear. These equations are solved with the assistance of modern computerized methods of applied mechanics and admit of the interpretation on the simplest type of analog computers MN-7, as a solution to problems of vibration theory and the theory of stability. It were found in this phase trajectories allow within engineering accuracy to determine such critical conditions in which the research object loses stability associated with its rollover.

Keywords: resistance loss; lifting machinery; emergency repair work; the separatrix; the supporting elements of machines; vibration theory

Постановка проблеми

Проведений аналіз виконання робіт з використанням підйомно-транспортних машин (підъемників, кранів, вишек і т. п.) показав, що однією з причин виникнення відхилень в їхній роботі є втрата стійкості, що призводить до травмування працівників при виконанні різних видів робіт, в тому числі спеціальних видів робіт в екстремальних ситуаціях (проведення аварійних, аварійно-восстановительних, спасателських в висотних спорудах і будівлях) [1–4; 14]. Тому прогноз відмов в роботі машин і обладнання, що може служити причиною втрати їхньої стійкості, в тому числі опрокидання, є важливою і актуальною задачею, направленою на підвищення безпеки даних робіт.

Аналіз останніх досліджень, виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

В даній роботі досліджується безпека виконання робіт за рахунок прогнозу стійкості конструкцій підйомно-транспортних машин (в подальшому «об'єкти»), призначених для підняття і опускання вантажів на висоту при веденні будівельних, ремонтно-будівельних і аварійно-восстановительних робіт на висотах. А також – при спасанні людей з етажер висотних будівель і споруд в випадках виникнення незвичайних ситуацій (ЧС). Для дослідницьких цілей використовуються дискретні динамічні моделі, які представляють собою сукупність зосереджених мас, зв'язаних несучими пружними з'єднувачими зв'язками.

К даній запропонованій узагальненій моделі, розробленій авторами, входять рівняння вібрацій і динамічної стійкості конструкції об'єкта відносно природних ребер опрокидання. Отримані системи диференціальних рівнянь можуть бути і лінійними і нелінійними. Ці рівняння розв'язуються з використанням сучасних методів комп'ютеризованої прикладної механіки і повністю допускають інтерпретації на простіших аналогових обчислювальних машинах типу МН-7 як рішення задач теорії коливань і теорії стійкості. Знайдені при цьому фазові траєкторії дозволяють в межах інженерної точності визначити такі критичні умови, при яких об'єкт

дослідження втрачає стійкість, пов'язану з його опрокиданням. Естественно, використання розглянутих об'єктів в будівельній промисловості не допускають загальної втрати їхньої стійкості (опрокидання кранів), що передбачено вимогами охорони праці в будівництві.

Розглянуті об'єкти відрізняються відносно великою висотою розгортання, досягає 50–60 м, і в той же час порівняно малою площею опори нижньої частини їхньої конструкції (ходовою частиною або, інакше, порталом). Цим обставинами обумовлено високе розташування сумарного центру ваги на геометрії контуру всього об'єкта.

При виготовленні подібних виробів машинобудування за кордоном, як правило, використовують спрощені конструкції в певних межах малої вигнутої жорсткості (EI) з'єднувачих зв'язок, що сопряжено с, взагалі кажучи, великими деформаціями і переміщеннями елементів об'єкта в процесі застосування його на практиці. При штатних режимах роботи силових механізмів (наприклад, на «підйом» або на «спуск») тут можуть виникати суттєві механічні коливання конструкції. Це, в свою чергу, збільшує ймовірність втрати стійкості, т. є. опрокидання об'єкта, що пов'язано з підвищеною небезпечністю для обслуговуючого персоналу і навіть з травматизмом і смертністю людей, знаходячись в робочій зоні. Крім того, в певному сенсі слабе затухання (демпфування) пружних коливань, після припинення і во время дії зовнішніх впливів, завжди сприяє шкідливому фізіологічному впливу вібрацій на оператора (крановика), а також несприятливо сказується на працездатності об'єкта.

Існуючі методи розрахунку недостатньо строго враховують динаміку процесів, які виникають в коливаючомуся об'єкті, оскільки раніше ці методи розроблялись, головним чином, для не габаритних по висоті конструкцій, але з великою жорсткістю складових елементів. Це автопідйомники, автолестниці, башенні крани і др. машини застарілих зразків.

Ціль роботи – підвищення безпеки ведення робіт з використанням підйомно-транспортного обладнання.

Изложение основного материала исследований

Новейшие конструкции объектов, используемые 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 требуют более точных, и в то же время надежных инженерных методов расчета, обеспечивающих безопасность их эксплуатации с точки зрения охраны труда строителей и не только.

Анализ публикаций

Исторически впервые вопрос устойчивости подобных объектов был рассмотрен в работе Е. А. Вышнеградского [5; 8–9]. 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:

$$\eta = M_u / M_w, \quad (1)$$

где M_u – восстанавливающий момент; M_w – опрокидывающий момент.

Вышеградским, при вычислении восстанавливающего и опрокидывающего моментов, учитывались только силы статики, действующие на объект, потому что для объектов (например, подъемных кранов) в то время характерны были относительно малые скорости работы механизмов и большие жесткости всех элементов конструкций. 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 появилось много работ [6; 7], посвященных 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 [6]. 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. То есть силовые нагрузки рассматривались как постоянные, действующие бесконечно долго. Другими словами, – все в том же режиме статики.

А. А. Яблонский [6–10] тоже указывал на необходимость учитывать влияние динамики, возникающей в неустановившихся режимах работы механизмов подъемно-транспортных машин, на устойчивость исследуемых объектов. Он определял 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 [4] 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:

$$S_{rI} = (M_G + M_{pm} + M_w) / M_Q, \quad (2)$$

где M_G – алгебраическая сумма моментов собственного веса сосредоточенных масс отдельных элементов объекта (в частности крана) относительно ребра опрокидывания, тонметры (т·м); M_{pm} – алгебраическая сумма моментов сил инерции сосредоточенных масс относительно ребра опрокидывания, (т·м); M_w – алгебраическая сумма моментов ветровой нагрузки в рабочем состоянии крана относительно ребра опрокидывания, (т·м); M_Q – момент от веса, равного грузоподъемности (Q), относительно ребра опрокидывания, (т·м); $S_{rI} \geq 1,1$ – степень защищенности башенных кранов от опрокидывания; I – индекс ребра опрокидывания, относительно которого устанавливается степень защищенности объекта.

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.

Традиционный способ определения сил инерции в рассматриваемых исследованиях устойчивости вызывает 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. 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 земли), 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 [5] в части раздела «устойчивость» детально рассмотрены колебательные процессы специального вида. Например, для устойчивых колебаний треугольной формы [11] характерен фазовый портрет вида (рис. 1).

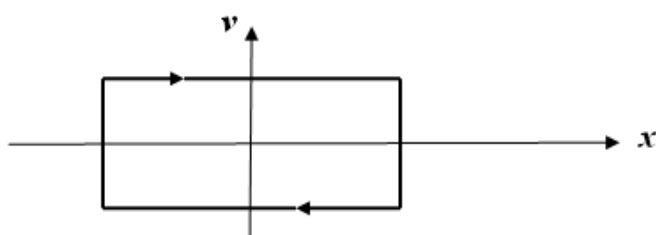


Рис. 1. Фазовая траектория незатухающих устойчивых треугольных колебаний: x – координата линейного осциллятора; v – его скорость / The phase trajectory of stable triangular undamped oscillations: x – coordinate of the linear oscillator; v – the speed

В условиях отсутствия действия сил демпфирования в динамической системе (затухающие колебания) фазовым траекториям присуще наличие особых точек (седловые точки). В качестве их может выступать начало координат, как, например, на рисунке 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.

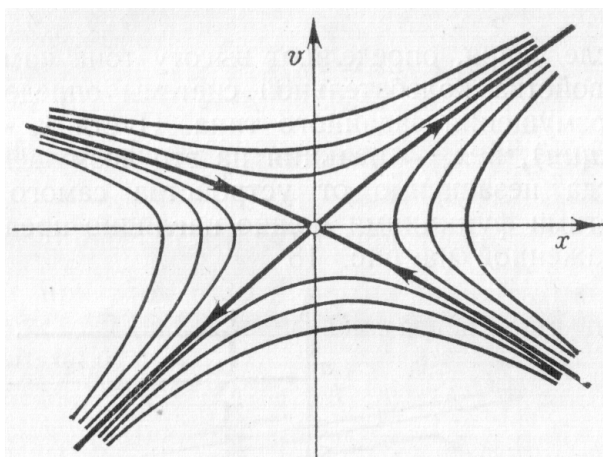


Рис. 2. Фазовый портрет с особой точкой $(0; 0)$ типа седла / The phase portrait of a singular point $(0, 0)$ of the saddle type

Подход к определению устойчивого положения равновесия для рассматриваемых в диссертации объектов можно позаимствовать из несложного примера, приведенного в работах [12]. А именно, рассматривается симметричная относительно фронтальной плоскости конструкция объекта в виде параллелепипеда (башня), расположенного на плоском недеформируемом горизонтальном основании, по которому проскальзывание не допускается, но возможны колебания (качания) башни – повороты относительно своих ребер опрокидывания, расположенных на абсолютно жестком основании (рис. 3).

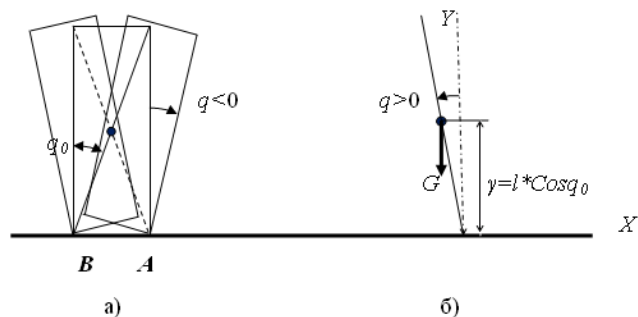


Рис. 3. Упрощенные схема (а) и модель (б) колебаний звена объекта относительно своих ребер опрокидывания / Simplified scheme (a) and model (b) object-level oscillations about their tilting edges

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 рисунке 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 :

$$(G/g)\gamma^{2\bar{q}} - Gl \sin(q_0 + q) = 0, \text{ для } -\pi/2 < q < 0. \quad (3)$$

– при повороте относительно ребра B :

$$(G/g)\gamma^{2\bar{q}} + Gl \sin(q_0 - q) = 0, \text{ для } 0 < q < \pi/2. \quad (4)$$

с учетом начальных условий

$$\bar{q} = 0, q = q_m. \text{ – начальные условия} \quad (5)$$

Что касается начальных условий, 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 (3) и (4) на фазовой плоскости, отвечающих симбиозу траекторий рисунков 1 и 2, представлено на рисунке 4. (Фазовая плоскость, как и на рисунке 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 \dot{q} своими частями, образуют область устойчивых колебаний, границей которой является ромб подобно прямоугольнику на рисунке 1. Вне этой области колебания являются неустойчивыми, т. к. координаты q и \dot{q} устремляются в бесконечность с течением времени.

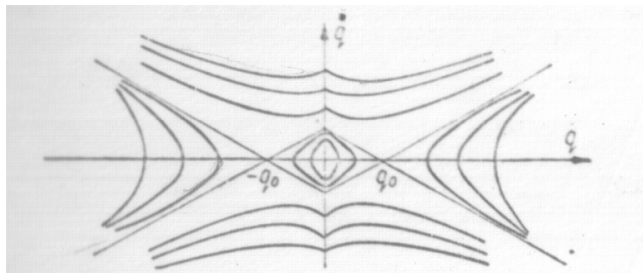


Рис. 4. Вид решения уравнений (3) и (4) в фазовых координатах / Type of solutions of equations (3) and (4) in the phase coordinates

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 / квазистатики, отрыва одной из пар колес или аутригеров. В таком гипотетическом случае объект может колебаться 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 . А на их основании проверять: возрастают, уменьшаются или же остаются неизменными амплитуды колебаний сосредоточенных масс.

В первом случае система будет неустойчива, в двух других – устойчива. В данной диссертационной работе поставлена задача определения предельных отклонений объектов, превышение которых приводит к потере общей устойчивости системы, т. е. к опрокидыванию.

Выводы

Проведен анализ исследований по повышению устойчивости подъемно-транспортного оборудования. Установлено, что выведенные системы уравнений бывают как линейными, так и нелинейными, которые могут быть решены с помощью программ современной компьютерной техники как задачи теории колебаний и теории устойчивости прикладной механики. При этом найдены фазовые траектории, позволяющие в пределах инженерной точности определить критические условия, при которых подъемно-транспортные машины и оборудование теряют устойчивость в связи с их опрокидыванием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Охрана труда в строительстве : учебник / [Беликов А. С., Сафонов В. В., Нажа П. Н. и др.]; под общ. ред. А. С. Беликова. – Киев : Основа, 2014. – 592 с.
2. Рятувальні роботи під час ліквідації надзвичайних ситуацій : посібник / [В. Г. Аветисян, М. І. Адаменко, В. Л. Александров та ін.]. – Київ : Основа, 2006. – 240 с.
3. Беликов А. С. Обеспечение безопасности при выполнении работ повышенной опасности [Текст] / А. С. Беликов, О. А. Сабитова, В. А. Голендер, В. А. Шаломов // Международный научный журнал. – 2015. – № 2. – С. 144–158.
4. Інженерна техніка та спеціальні машини для ліквідації надзвичайних ситуацій : навч. посіб. / [О. М. Ларін, І. М. Грицина, Н. І. Грицина та ін.]. – Харків : НУЦЗУ, КП «Міськдрук», 2012 – 380 с.
5. Рудь Ю. С. Теория колебаний механических систем с кинематическим возбуждением и ее применение к движению карьерных самосвалов / Ю. С. Рудь, И. С. Радченко, В. Ю. Белоножко, А. С. Ткаченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №2/9 (44). – С.32–38.
6. Регламентация активной и пассивной безопасности автотранспортных средств : монография / [А. И. Рябинский, Б. В. Кисуленко, Т. Э. Морозова]. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 462 с.
7. Современные системы конструктивной безопасности автомобилей : монография / [Ю. Ю. Покровский, К. С. Ремнев, И. С. Степанов, В. В. Ломакін]. – Тула : Издательство ТулГУ, 2007. – 163 с.
8. Махутов Н. А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования : монография / Н. А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2008. – 528 с.
9. Дурденко В. А. Количественная оценка надежности интегрированной системы безопасности на основе логико-вероятностного моделирования / В. А. Дурденко, А. А. Рогожин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2013. – № 2. – С.207–215.

10. Daniel J. Holt. Fuel cell powered vehicle / Holt Daniel J. – Automotive engineering. – SAE, 2002. – 132 p.
11. Sadykhov G.S. Average Number of Failure-Free Operations up to Critical Failure of a Technologically Dangerous Facility: Calculation, Limit and Non-Parametric Estimates / G.S. Sadykhov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – Vol. 42, № 1. – 2013. – Pp. 81–88.
12. Tanaka K. Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach / K. Tanaka, H.O. Wang. – New-York : Wiley, 2001. – Pp. 76–79.
13. Grote K.G. Die bewertungsmethodik der bauausführung der untergleiszone der hauptträger der verladebrücke / KG. Grote, J. Postnikov, N. Makarenko, P. Gavrish, V. Schepotko, V. Kassov, V. Koinasch // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – № 3(28). – С. 110–113.
14. Дружинина О. В. Анализ технической устойчивости и стабилизация управляемых динамических систем / О. В. Дружинина, Т. С. Климачкова, А. С. Мулкиджан // Наукоемкие технологии. – 2013. – Т. 14. – № 6. – С. 59–65.

REFERENCES

1. Belikov A.S., Safonov V.V., Nazha P.N., Chalyiy V.G., Shlyikov N.Yu., Shalomov V.A. and Ragimov S.Yu. *Ohrana truda v stroitelstve* [A labour protection in building]. Kiev : Osнова, 2014, 592 p. (in Russian).
2. Avetisyan V.G., Adamenko M.I. and Aleksandrov V.L. *Ryatuvalni roboti pid chas likvidatsiyi nadzvichaynih situatsiy* [Rescue work during emergency response]. Kiev : Osнова, 2006, 240 p. (in Ukrainian).
3. Belikov A.S., Sabitova O.A., Golender V.A. and Shalomov V.A. *Obespechenie bezopasnosti pri vyipolnenii rabot povyishennoy opasnosti* [Ensuring the security of the works of increased danger]. *Mezhdunarodnyiy nauchnyiy zhurnal* [International Journal]. 2015, no. 2, pp. 144–158. (in Russian).
4. Larin O.M., Gritsina I.M. and Gritsina N.I. *Inzhenerna tehnika ta spetsialni mashiny dlya likvidatsiyi nadzvichaynih situatsiy* [Engineering machinery and special machines for disaster management]. Harkiv : NUTZU, KP «Miskdruk», 2012, 380 p. (in Ukrainian).
5. Rud Yu.S., Radchenko I.S., Belonozhko V.Yu. and Tkachenko A.S. *Teoriya kolebaniy mehanicheskikh sistem s kinematicheskim vzbuzhdeniem i ee primenenie k dvizheniyu karerinyh samosvalov* [Theory of oscillations of mechanical systems with kinematic excitation and its application to the movement of dump trucks]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy* [Eastern European advanced technology magazine]. 2010, no. 2/9 (44), pp. 32–38. (in Russian).
6. Ryabchinskiy A.I., Kisulenko B.V. and Morozova T.E. *Reglamentatsiya aktivnoy i passivnoy bezopasnosti avtotransportnyih sredstv* [Regulation of active and passive safety of vehicles]. Moscow : Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2006, 462 p. (in Russian).
7. Pokrovskiy Yu.Yu., Remnev K.S., Stepanov I.S. and Lomakin V.V. *Sovremennyye sistemy konstruktivnoy bezopasnosti avtomobiley* [Modern structural safety of vehicles]. Tula : Izdatelstvo TulGU, 2007, 163 p. (in Russian).
8. Mahutov N.A. *Prochnost i bezopasnost. Fundamentalnyie i prikladnyie issledovaniya* [Durability and safety. Basic and applied research]. Novosibirsk : Nauka Publ., 2008, 528 p. (in Russian).
9. Durdenko V.A. and Rogozhin A.A. *Kolichestvennaya otsenka nadezhnosti integrirovannoy sistemy bezopasnosti na osnove logiko-veroyatnostnogo modelirovaniya* [Quantitative assessment of the reliability of the integrated security system based on logical-probabilistic modeling]. *Bulletin of Voronezh Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [Institute of Russian Ministry of Internal Affairs]. 2013, no. 2, pp. 207–215. (in Russian).
10. Daniel J. Holt. Fuel cell powered vehicles. Automotive engineering, SAE, 2002, 132 p.
11. Sadykhov G.S. Average Number of Failure-Free Operations up to Critical Failure of a Technologically Dangerous Facility: Calculation, Limit and Non-Parametric Estimates. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, vol. 42, no. 1, 2013. pp. 81–88.
12. Tanaka K. and Wang H.O. Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach. New-York : Wiley, 2001, pp. 76–79.
13. Grote K.G., Postnikov J., Makarenko N., Gavrish P., Schepotko V., Kassov V. und Koinasch V. Die bewertungsmethodik der bauausführung der untergleiszone der hauptträger der verladebrücke *Visnik Donbaskoyi derzhavnoyi mashinobudivnoyi akademiyi* [Bulletin of Donbass State Engineering Academy]. Kramatorsk : DDMA, 2012, no. 3(28), pp. 110–113. (in German).
14. Druzhinina O.V., Klimachkova T.S. and Mulkidzhan A.S. *Analiz tehnikeskoy ustoychivosti i stabilizatsiya upravlyaemyih dinamicheskikh sistem* [Analysis of technical stability and stabilization of controlled dynamic systems] *Naukoyomkie tehnologii* [High Technologies]. 2013, vol. 14, no. 6, pp. 59–65. (in Russian).

Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. С. В. Шатовым (Украина); д-ром техн. наук, проф. С. З. Полищуком (Украина)

Поступила в редакцию 13.10.2016

Принята к печати 17.10.2016