

На правах рукописи

ФЛЮГЕЛЬ Франк

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ С ГРУЗОМ НА
ПРОСТРАНСТВЕННОМ КАНАТНОМ ПОДВЕСЕ

Специальность 05.05.04 - Дорожные, строительные и
подъемно - транспортные машины

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт - Петербург 2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор А.Н.Орлов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Н.О.Вильчевский

кандидат технических наук, доцент В.И.Карпов

Ведущая организация: АО "Подъемтрансмаш", г. Санкт-Петербург

Защита состоится "19" марта 2002 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.24 при Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, корп. 1, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГТУ.

Автореферат разослан "19" февраля 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

В. Н. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Особенности современного экономического положения предприятий (борьба за заказы, конкуренция) требуют создания конкурентоспособных машин в кратчайшие сроки, когда зачастую нет ни времени, ни средств на создание и испытание опытного образца в реальных условиях эксплуатации, вплоть до аварийных. Конструктор должен быть уверен, что произведенные им расчеты учитывают процессы, реально протекающие при работе кранов. Поэтому важным является разработка математических моделей кранов, их экспериментальная проверка и реализация на ЭВМ с целью получения требуемых показателей.

При этом надо иметь в виду, что процесс формирования модели для сложной динамической системы является трудоемкой задачей, которую каждый раз приходится решать заново, как только исследователь сталкивается с новой конструкцией. В связи с этим создание обобщенных моделей и алгоритмов на их основе, пригодных для достаточно широкого класса кранов и их элементов, увеличивает возможность решения больших и практически важных задач. Значение обобщенных моделей значительно возросло в последнее время в связи с проблемой создания систем автоматизированного проектирования грузоподъемных машин, а существующий уровень ЭВМ позволяет снять большинство ограничений, связанных со сложностью расчетных алгоритмов. Современные мощные высокоскоростные и металлоемкие краны - достаточно сложные объекты конструирования, тщательный и полный динамический расчет которых позволяет вскрыть существенные резервы и одновременно избежать ошибок при проектировании.

Все попытки добиться увеличения производительности кранов только увеличением их рабочих скоростей оканчивались снижением средней производительности крана по следующим причинам: а) увеличивалось время на точную остановку и успокоение колебаний груза; б) возрастало время простоев крана в результате повышения износа и отказов аппаратуры управления из-за увеличения числа включений, необходимых для гашения колебаний груза. Таким образом, для увеличения производительности и надежности кранов с гибким подвесом груза необходимо исследовать явления, протекающие при раскачивании груза, и обеспечить его перемещение с малыми колебаниями. Последний фактор имеет также социальный аспект - напряженность труда и утомляемость оператора, условия его работы. Решение этого вопроса позволит использовать краны для работы в автоматическом цикле в составе гибких производственных систем.

Необходимо отметить, что до недавнего времени транспортно-перегрузоч-

ный процесс относили к вспомогательным, придавая ему второстепенное значение, и там, где возможно, старались обойтись без автоматизации кранов. Теперь, когда все чаще краны становятся неотъемлемой частью системы автоматизированных машин, отношение к их автоматизации меняется. Однако она эффективна лишь тогда, когда применяются системы для гашения колебаний груза. В противном случае раскачивания груза вносят неопределенность в управление краном и сводят к нулю эффект от автоматизации.

Цель диссертационной работы - создание методики построения обобщенных математических моделей грузоподъемных кранов с пространственными канатными подвесами груза и ее реализация для кранов мостового и стрелового типов, разработка инженерных методов определения динамических нагрузок в подъемных канатах при поперечных колебаниях груза и теоретическое исследование системы для автоматического управления приводом механизма передвижения крановой тележки с целью гашения колебаний груза.

Указанная цель определила следующие основные задачи исследования.

1. Разработать метод построения математических моделей свободных колебаний грузов на пространственных канатных подвесах с учетом возможного ослабления одного или нескольких подъемных канатов и реализовать его для наиболее распространенных траверсной и грейферной схем подвесов груза.

2. Создать методику построения обобщенных математических моделей грузоподъемных кранов с грузом на пространственном канатном подвесе и реализовать ее для кранов мостового и стрелового типов.

3. Создать инженерные методы определения динамических нагрузок в подъемных канатах при поперечных колебаниях груза и допускаемого из условия отсутствия ослабления подъемных канатов ускорения точек подвеса груза.

4. Показать возможность построения устройства на основе цифровой вычислительной техники для управления приводом механизма передвижения крановой тележки с целью гашения колебаний груза.

5. Построить и исследовать систему для автоматического управления приводом механизма передвижения крановой тележки с целью гашения колебаний груза.

На защиту выносятся следующие результаты, полученные лично автором и обладающие научной новизной:

1. Метод построения математических моделей свободных колебаний грузов на пространственных канатных подвесах с учетом возможного ослабления одного или нескольких подъемных канатов.

2. Методика построения обобщенных математических моделей грузоподъемных кранов с пространственными канатными подвесами груза и ее реализация для кранов мостового и стрелового типов.

3. Инженерные методы определения динамических нагрузок в подъемных канатах при поперечных колебаниях груза и допускаемого из условия отсутствия ослабления подъемных канатов ускорения точек подвеса груза.

4. Результаты исследования системы для автоматического управления приводом механизма передвижения крановой тележки с целью гашения колебаний груза.

Достоверность научных положений и выводов диссертационной работы базируется на накопленном опыте теоретических исследований и проектирования кранового оборудования, учете нормативных требований к крановым механизмам и металлоконструкциям, использовании апробированных в других отраслях машиностроения физических предпосылок и методов динамики механизмов, машин и конструкций, сопоставлении результатов расчета с данными натурных исследований контейнерного перегружателя.

Практическая ценность работы заключается в том, что теория, методы инженерного расчета и программы для ЭВМ были использованы при проектировании кранов мостового и стрелового типов. Проведенные исследования и полученные результаты создали предпосылки для разработки систем автоматического управления крановыми механизмами с целью гашения колебаний груза, что позволит использовать краны в автоматизированных производственных системах.

Промышленная реализация работы. Основные результаты диссертации внедрены в расчетную практику отдела главного конструктора АО "Подъемтрансмаш" и использованы при проектировании порталных и специальных мостовых кранов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

а) Всесоюзной конференции "Проблемы повышения прочности и надежности стальных канатов" в г. Одессе, 1989 г.;

б) Всероссийской конференции "Новое в подъемно-транспортной технике" в г. Москве, 1994 г.;

в) Республиканской научно-технической конференции "Строительные и дорожные машины и их использование в современных условиях" в г. Санкт-Петербурге, 1995 г.;

г) заседаниях кафедры "Подъемно-транспортные и строительные машины" Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в восьми печатных работах и одном патенте.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 273 наименований (из них 67 иностранных)

и семи приложений. Материал размещен на 101 страницах машинописного текста, 33 рисунках на 23 стр. и 7 таблицах на 6 стр., 33 стр. списка литературы и 20 стр. приложений. Общий объем диссертации 184 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, основные научные положения, выносимые на защиту, практическая ценность работы.

Первая глава посвящена разработке метода построения математических моделей свободных колебаний грузов на пространственных канатных подвесах с учетом возможного ослабления подъемных канатов и его реализации для наиболее распространенных на высокоскоростных перегрузочных кранах мостового и стрелового типов траверсной и грейферной схем подвесов груза.

В рамках диссертационной работы рассматриваются подвесы груза, динамические модели которых приведены на рис. 1. Траверсный подвес по схеме 1Г (рис. 1,а) широко используется на контейнерных кранах и транспортных кранах прокатных цехов, грейферный подвес по схеме 2Г (рис. 1,б) представляет собой наиболее распространенный подвес грейфера для четырехканатных грейферов.

Разработанный метод базируется на методике построения математических моделей свободных колебаний грузов на пространственных канатных подвесах без учета ослабления подъемных канатов, разработанной А.Н.Орловым.

Положение груза по отношению к неподвижной системе координат x, y, z определяется координатами его центра масс $x_{Г}, y_{Г}, z_{Г}$ и тремя углами θ, ψ и φ (см. рис. 2), построение которых аналогично построению самолетных углов.

Дифференциальные уравнения, описывающие свободные колебания груза на канатном подвесе без учета ослабления подъемных канатов, имеют вид:

$$[a]_{Г} \{\ddot{q}\}_{Г} + [c]_{Г} \{q\}_{Г} = \{0\}, \quad (1)$$

где вектор-столбец обобщенных координат

$$\{q\}_{Г} = [x_{Г}, y_{Г}, z_{Г}, \theta, \psi, \varphi]^T, \quad (2)$$

$[a]_{Г}$ и $[c]_{Г}$ - симметричные инерционная и квазиупругая матрицы; элементы матрицы $[c]_{Г}$ зависят от схемы подвеса груза.

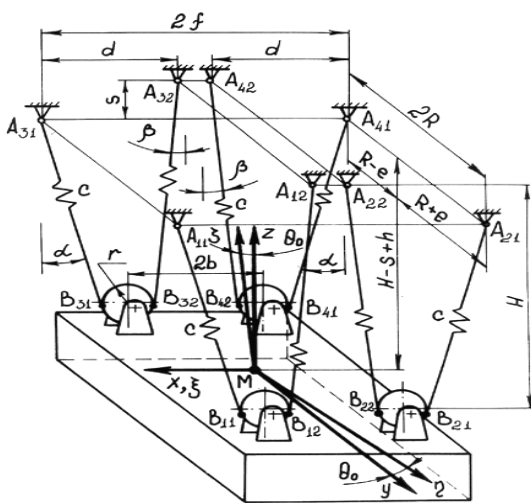
Математическая модель свободных колебаний груза при возможности ослабления одного или нескольких подъемных канатов строится следующим образом. Текущие значения натяжений в канатах определяются по формуле

$$S_i = S_{0i} + c_{Ki} \delta_i,$$

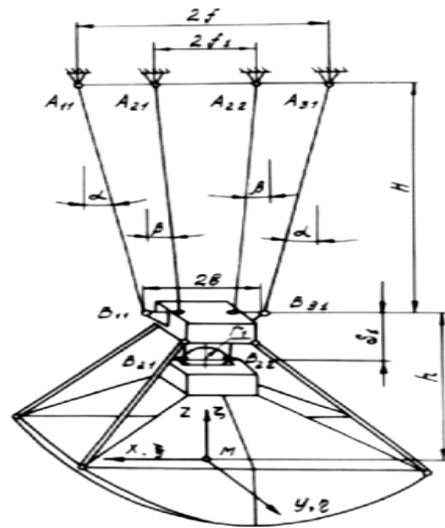
4

Динамические модели подвесов груза

а)



б)



а - схема 1Г, б - схема 2Г

Рис. 1

Связь между системами координат xuz и $\xi\eta\zeta$

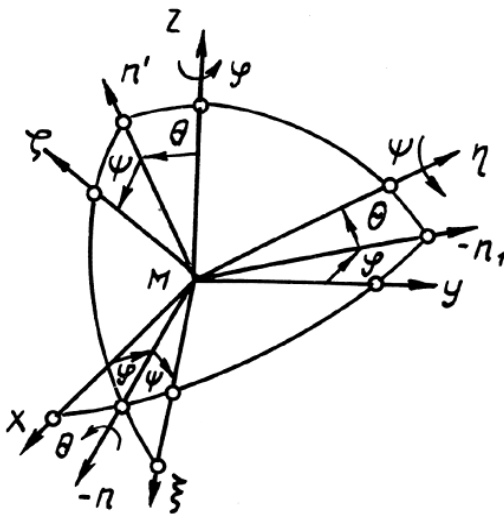


Рис. 2

где S_{0i} - статическое натяжение в i -ом канате, c_{Ki} и δ_i - соответственно коэффициент жесткости и динамическое удлинение i -го каната. Если все $S_i \geq 0$, то

5

дифференциальные уравнения движения имеют вид (1). Если какое-либо $S_i < 0$, то уравнения движения принимают вид:

$$[a]_{\Gamma} \{\ddot{q}\}_{\Gamma} + [c]_{OC} \{q\}_{\Gamma} = \{F\}_{\Gamma}.$$

(3)

Специфика определения элементов матрицы $[c]_{OC}$ и вектора $\{F\}_{\Gamma}$ заключается в том, что в выражении для потенциальной энергии системы исключается энергия сил упругости ослабленных канатов. При этом элементы матрицы $[c]_{OC}$ и вектора $\{F\}_{\Gamma}$, в зависимости от того, сколько и какие канаты ослаблены, будут различны.

Для подвеса груза по схеме 1Т на рис. 1,а текущие значения натяжений в подъемных канатах получены в виде:

$$S_i = \frac{G}{4(\cos \alpha + \cos \beta)} \left(1 \begin{matrix} - \\ + \\ + \\ + \end{matrix} \frac{e}{R} \right) + c_K (\cos \alpha + \cos \beta) \cdot \left\{ -z_{\Gamma} \begin{matrix} - \\ + \\ + \\ + \end{matrix} \left[x_{\Gamma} \operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2} - \psi \left(b - h \operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \right] \begin{matrix} - \\ + \\ + \\ - \end{matrix} \left(R \begin{matrix} + \\ + \\ - \\ - \end{matrix} e \right) \left[\theta \begin{matrix} - \\ + \\ - \\ + \end{matrix} \varphi \operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2} \right] \right\}, \quad (4)$$

где G - вес груза. В выражении (4) первый ряд знаков по горизонтали относится к $i=1$, второй к $i=2$ и т.д.

Если один или несколько канатов ослабевают, то матрица $[c]_{OC}$ представляется в виде

$$[c]_{OC} = 0,25 \begin{pmatrix} + & - & + & + \\ + [c]_{\Gamma} & + [c]_1 & + [c]_2 & - [c]_3 \\ + & + & - & + \end{pmatrix};$$

(5)

вектор-столбец $\{F\}_{\Gamma}$:

$$\{F\}_{\Gamma} = [F_x, 0, F_z, F_{\theta}, F_{\psi}, F_{\varphi}]^T, \quad (6)$$

элементы которого определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned}
 F_x &= \begin{matrix} + \\ + \\ - \end{matrix} 0,25 G \operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2} \begin{pmatrix} - \\ + \\ + \end{pmatrix} \frac{e}{R}, \quad F_z = \begin{matrix} + \\ + \\ + \end{matrix} 0,25 G \begin{pmatrix} - \\ + \\ + \end{pmatrix} \frac{e}{R} - G, \\
 F_\theta &= \begin{matrix} + \\ + \\ - \end{matrix} 0,25 G \frac{(R^2 - e^2)}{R}, \quad F_\psi = \begin{matrix} - \\ + \\ + \end{matrix} 0,25 G \left(b - h \operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \begin{pmatrix} - \\ + \\ + \end{pmatrix} \frac{e}{R}, \\
 F_\varphi &= \begin{matrix} - \\ + \\ - \end{matrix} 0,25 G \operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2} \frac{(R^2 - e^2)}{R}.
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

6

В выражениях (5) и (7) первые ряды знаков по горизонтали относятся к случаю, когда натянут первый канат, а остальные ослаблены ($S_1 \neq 0$, $S_2 = S_3 = S_4 = 0$), вторые ряды знаков - когда работает второй канат, а остальные ослаблены ($S_2 \neq 0$, $S_1 = S_3 = S_4 = 0$) и т. д. Если не ослаблены несколько канатов, то суммируются элементы по соответствующим рядам. Так, например, если не ослаблены второй и четвертый канаты ($S_2 \neq 0$, $S_4 \neq 0$, $S_1 = S_3 = 0$), то $[c]_{OC}$ и элементы $\{F\}_\Gamma$ представятся в виде:

$$[c]_{OC} = 0,5 ([c]_\Gamma - [c]_2), \quad F_x = -0,5 G \operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2}, \quad F_z = -0,5 G, \\
 F_\theta = 0, \quad F_\psi = 0,5 G \left(b - h \operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2} \right), \quad F_\varphi = 0.$$

Способ представления элементов вектора $\{F\}_\Gamma$ и матрицы $[c]_{OC}$ является удобным для программирования на ЭВМ.

Для грейферного подвеса груза по схеме 2Г на рис. 1,б натяжения S_1 и S_3 в поддерживающих канатах $A_{11}B_{11}$ и $A_{31}B_{31}$ и натяжение S_2 в замыкающих канатах $A_{21}B_{21}B_{22}A_{22}$ получены в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 S_1 &= S_{0\Pi} + c_\Pi \cos \alpha [-z_\Gamma - x_\Gamma \operatorname{tg} \alpha + \psi (b - h \operatorname{tg} \alpha)], \\
 S_3 &= S_{0\Pi} + c_\Pi \cos \alpha [-z_\Gamma + x_\Gamma \operatorname{tg} \alpha - \psi (b - h \operatorname{tg} \alpha)], \\
 S_2 &= S_{03} - 2c_3 z_\Gamma \cos \beta,
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где c_Π и c_3 - соответственно коэффициенты жесткости поддерживающих и замыкающих канатов, $S_{0\Pi}$ и S_{03} - статические нагрузки в поддерживающих и замыкающих канатах, величина которых зависит от того, на каких канатах висит грейфер.

В случае грейферного подвеса рассмотрен случай, когда ослабевает один из поддерживающих канатов. Дифференциальные уравнения движения имеют вид (3). Когда грейфер висит на поддерживающих и замыкающих канатах, матрица

$$[c]_{OC} = [c]_{\Gamma} - [c]_1 \pm [c]_2, \quad (9)$$

элементы вектора $\{F\}_{\Gamma}$ по (6):

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \pm \frac{G \sin \alpha}{2(\cos \alpha + \cos \beta)}, & F_z &= - \frac{G \cos \alpha}{2(\cos \alpha + \cos \beta)}, \\ F_{\theta} &= 0, & F_{\psi} &= \mp \frac{G \cos \alpha (b - h \operatorname{tg} \alpha)}{2(\cos \alpha + \cos \beta)}, & F_{\varphi} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10) верхние знаки относятся к случаю, когда ослабе-

вает канат $A_{31} B_{31} (S_3=0)$, нижние - канат $A_{11} B_{11} (S_1=0)$. Если грейфер висит

7

только на поддерживающих канатах, то

$$[c]_{OC} = 0,5 ([c]_{\Gamma} \pm [c]_2),$$

$$F_x = \pm 0,5 G \operatorname{tg} \alpha, \quad F_z = -0,5 G, \quad F_{\theta} = 0, \quad F_{\psi} = \mp 0,5 G (b - h \operatorname{tg} \alpha), \quad F_{\varphi} = 0.$$

Таким образом, контролируя моменты ослабления каждого из канатов по формулам (4) или (8), необходимо переходить от системы уравнений (1) к системе (3) с соответствующими значениями элементов $[c]_{OC}$ и $\{F\}_{\Gamma}$.

Во второй главе диссертации разработана обобщенная математическая модель стреловых кранов в виде механизмов с жесткими звеньями и грузом на пространственном канатном подвесе. В известных моделях отсутствует учет действительной схемы запасовки подъемных канатов с возможностью их ослабления при колебаниях груза, модели разработаны для отдельных случаев конструктивно-компоновочных исполнений элементов крана.

В качестве динамической модели стреловых кранов на рис. 3 представлена динамическая модель порталного крана, все звенья которого полагаются абсолютно жесткими. Движение крана с грузом изучается в неподвижной системе координат $x_K y_K z_K$. В качестве независимых обобщенных координат приняты угол φ_C наклона стрелы, перемещение центра масс груза за счет работы механизма подъема $z_{ПД}$ и угол φ_K вращения крана относительно оси $0_K z_K$, а также координаты $x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma}, \theta, \psi$ и φ , определяющие положение груза в системе $x y z$. Вектор обобщенных координат представлен в виде:

$$\{q\} = \left\{ \begin{array}{l} \{q\}_{\Gamma} \\ \{q\}_{M} \end{array} \right\}, \quad (11)$$

где $\{q\}_{\Gamma}$ определяется в соответствии с (2), $\{q\}_{M}$ - подвектор, определяющий работу крановых механизмов:

$$\{q\}_{M} = [\varphi_C, z_{ПД}, \varphi_K]^T.$$

Система дифференциальных уравнений, описывающая движение стреловых кранов при работе всех механизмов, получена в виде:

$$([A]_1 + [A]_2)\{\dot{q}\} + ([B]_1 + [B]_2)\{\dot{q}\} + ([C]_1 + [C]_2)\{q\} = \{F\} . \quad (12)$$

Все матрицы и вектор $\{F\}$ разбиты на блоки в соответствии с разбиением вектора обобщенных координат $\{q\}$ по (11). Квадратные симметричные матрицы $[A]_1$, $[B]_1$, $[C]_1$, элементы которых при неизменном вылете стрелы постоянны:

$$[A]_1 = \begin{bmatrix} [a]_{\Gamma} & [A]_{12-1} \\ [A]_{21-1} & [A]_{M-1} \end{bmatrix}, [B]_1 = \begin{bmatrix} [b]_{\Gamma} & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix}, [C]_1 = \begin{bmatrix} [c]_{\Gamma} & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix}, \quad (13)$$

8

Динамическая модель кранов стрелового типа

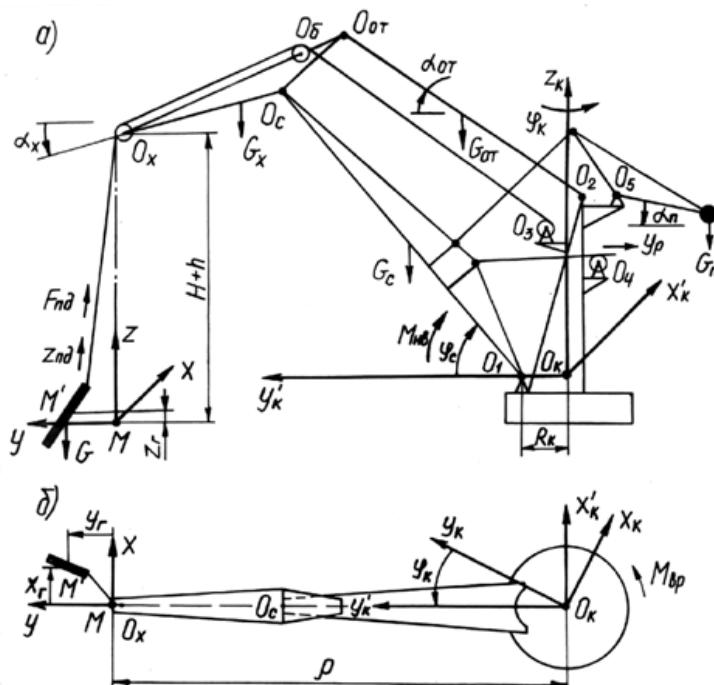


Рис. 3

где $[a]_{\Gamma}$, $[b]_{\Gamma}$ и $[c]_{\Gamma}$ - инерционная, диссипативная и квазиупругая матрицы груза на гибком подвесе.

Элементы матрицы $[A]_2$ зависят от обобщенных координат груза, $[B]_2$ - от обобщенных скоростей $\dot{\phi}_k$ и $\dot{\phi}_c$, $[C]_2$ - от $\dot{\phi}_c^2$, $\dot{\phi}_k^2$ и произведения $\dot{\phi}_k \dot{\phi}_c$.

$$[A]_2 = \begin{bmatrix} [0] & [A]_{12-2} \\ [0] & [A]_{M-2} \end{bmatrix}, [B]_2 = \begin{bmatrix} [B]_{11-2} & [B]_{12-2} \\ [B]_{21-2} & [B]_{M-2} \end{bmatrix}, [C]_2 = \begin{bmatrix} [C]_{11-2} & [0] \\ [C]_{21-2} & [0] \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$[B]_{11-2}$ - кососимметричная гироскопическая матрица груза.

Вектор обобщенных сил $\{F\}$:

$$\{F\} = \left[P_{\text{ВГ}}^{\text{ВР}}, P_{\text{ВГ}}^{\text{ИВ}}, 0, 0, 0, 0, \dots, M_{\text{ИВ}} - M_G - M_{\text{Н}} - M_{\text{СТ}}^{\text{ИВ}} - M_{\text{ВК}}^{\text{ИВ}} - P_{\text{ВГ}}^{\text{ИВ}} u_{\rho}, \right. \\ \left. F_{\text{ПД}} - G, M_{\text{ВР}} - M_{\text{СТ}}^{\text{ВР}} - M_{\text{ВК}}^{\text{ВР}} - P_{\text{ВГ}}^{\text{ВР}} \cdot \rho \right]^T.$$

В векторе обобщенных сил $\{F\}$ учтены движущие (тормозные) усилия приводов ($M_{\text{ИВ}}, F_{\text{ПД}}, M_{\text{ВР}}$), ветровые нагрузки на груз и конструкцию крана, силы трения.

С целью создания модели, имеющей возможно более широкую область применения, использовано описание структуры системы изменения вылета (СИВ) порталных кранов, отражающее практически всю гамму элементов СИВ стреловых кранов, и аналитические выражения для кинематических передаточных функций первого порядка (аналогов передаточных отношений) СИВ кранов с грузом (входная координата - угол наклона стрелы $\varphi_{\text{С}}$) для различных конструктивных исполнений стреловых систем, уравнивающих устройств и механизмов изменения вылета. При этом в модель включены и новые структуры - шарнирно-сочлененные стреловые системы с произвольным расположением отклоняющего блока на хоботе (см. рис. 3) и уравнивающие устройства с противовесом на качающемся рычаге, расположенные под поворотной платформой крана.

Таким образом, полученная математическая модель стреловых кранов в виде (12) пригодна для любых схем подвесов груза (изменяются лишь элементы матриц $[c]_{\Gamma}$ в $[C]_1$ и $[b]_{\Gamma}$ в $[B]_1$) и конструктивно-компоновочных исполнений стреловых систем, уравнивающих устройств и механизмов изменения вылета, подъема груза и вращения крана. Если проводятся исследования с учетом ослабления подъемных канатов, то матрица $[c]_{\Gamma}$ в $[C]_1$ заменяется на $[c]_{\text{ОС}}$ согласно уравнению (3), а в вектор обобщенных сил $\{F\}$ добавляются элементы вектора $\{F\}_{\Gamma}$ по (6). В связи с вышесказанным, математическую модель в виде (12) можно назвать обобщенной математической моделью стреловых кранов.

Представление модели в виде составной совместно с динамическими графами груза сделало ее наглядной, что позволяет вскрыть структурные особенности крановой системы и сделать продуктивные выводы о ее динамическом поведении уже на стадии качественного анализа.

Для исследования работы крановых механизмов с учетом переключения сопротивлений в цепи ротора асинхронных двигателей с фазным ротором разработана программа для ЭВМ. Рассмотрена задача исследования аварийных режимов работы СИВ стреловых кранов - отказ тормозов или обрыв рейки. Обычно уравнивание стреловых систем кранов удается осуществить таким образом, что на всем диапазоне вылетов имеется несколько положений равно-

весия. Аналитически решена задача определения точек устойчивого и неустойчивого положения равновесия СИВ крана без груза.

При обрыве рейки или отказе тормозов стреловая система крана начинает движение к положению равновесия и проходит его за счет сил инерции. При этом возможны случаи достижения крайних положений и удары о концевые упоры. Для крана с грузом и без груза задача определения крайнего положения стреловой системы в аварийных ситуациях решена на ЭВМ.

Получены расчетные формулы для определения углов отклонения грузовых канатов в плоскости и из плоскости стреловой системы крана при работе механизма вращения, которые можно использовать при проектировочном расчете.

В третьей главе диссертации разработана обобщенная математическая модель кранов мостового типа в виде механизмов с жесткими звеньями и грузом на пространственном канатном подвесе. Динамическая модель кранов мостового типа представлена на рис. 4. Движение крана с грузом изучается в неподвижной системе координат $x_K y_K z_K$. В качестве независимых обобщенных координат приняты перемещения крана y_K и неповоротной тележки x_T , угол φ_T вращения поворотной тележки и перемещение груза $z_{ПД}$ за счет работы механизма подъема, а также координаты, определяющие положение груза на канатном подвесе.

Вектор обобщенных координат представлен в виде (11), где $\{q\}_Г$ в соответствии с (2), $\{q\}_М$ - подвектор, определяющий работу крановых механизмов:

$$\{q\}_М = [x_T, z_{ПД}, \varphi_T, y_K]^T.$$

Система дифференциальных уравнений, описывающая движение кранов мостового типа при работе всех механизмов, получена в виде (12), где матрицы $[A]_1, [B]_1, [C]_1$ имеют вид (13), $[A]_2, [B]_2, [C]_2$ - (14). Вектор обобщенных сил $\{F\}$:

$$\{F\} = \left[P_{ВГ}^{ПТ}, P_{ВГ}^{ПК}, 0, 0, 0, 0, \begin{matrix} | \\ F_{ПТ} - W_{ПТ} - P_{ВГ}^{ПТ} - P_{ВТ}, F_{ПД} - G, \end{matrix} \right.$$

$$\left. M_{ВР} - M_{СТ}^{ВР}, F_{ПК} - W_{ПК} - P_{ВК} - P_{ВГ}^{ПК} \right]^T.$$

Здесь, как и в математической модели кранов стрелового типа, если проводятся исследования с учетом ослабления подъемных канатов, то матрица $[c]_Г$ в $[C]_1$ заменяется на $[c]_{ОС}$ согласно уравнению (3), а в вектор обобщенных сил $\{F\}$ добавляются элементы вектора $\{F\}_Г$ по (6). Полученная математическая модель кранов мостового типа пригодна для любых схем подвесов груза и конструктивно-компоновочных исполнений крановых механизмов, поэтому ее можно назвать обобщенной математической моделью.

Динамическая модель кранов мостового типа

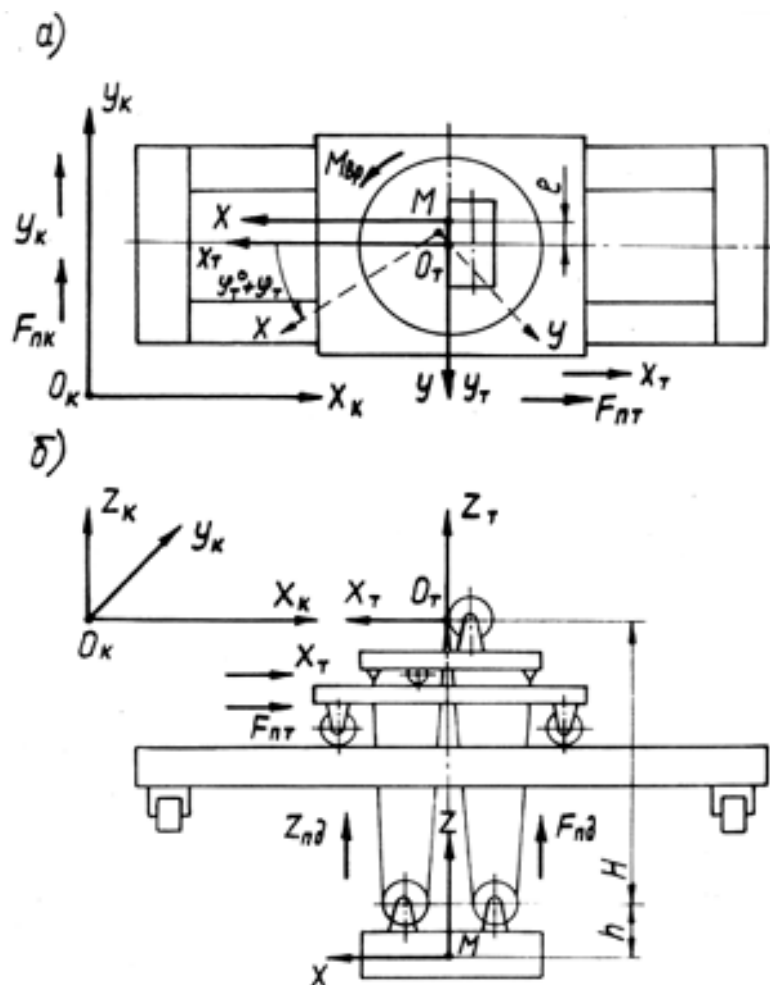


Рис. 4

Представление моделей кранов в виде составных позволило получить математические модели кранов мостового и стрелового типов в общем виде. Существенным отличием кранов мостового и стрелового типов является то, что если у стреловых кранов плоскости подвеса груза относительно стрелы не изменяются, то у кранов мостового типа с поворотной тележкой плоскости

12 подвеса груза относительно направлений движения крана и тележки могут изменяться, что усложняет уравнения движения.

Впервые путем моделирования на ЭВМ показано, что даже при нормальной работе механизма передвижения тележки с подвесом груза по схеме 1Т на рис. 1,а динамические нагрузки в подъемных канатах при поперечных колебаниях груза достигают значительных величин, и могут возникать ослабления одного или нескольких подъемных канатов. Получены аналитические выражения для определения динамических нагрузок в подъемных канатах при

поперечных колебаниях груза на подвесе по схеме 1Г и допускаемого из условия отсутствия ослабления подъемных канатов ускорения крановой тележки. Результаты сравнительных расчетов по полученным зависимостям и на ЭВМ показали хорошую сходимость результатов.

В четвертой главе диссертационной работы приведены результаты натурных исследований причального контейнерного перегружателя ПКП-32 с подвесом груза по схеме 1Г на рис. 1,а. Натурные исследования крана обеспечили проверку адекватности разработанных моделей по периодам собственных колебаний груза, отклонениям центра масс груза от положения равновесия, натяжениям в грузовых канатах. Экспериментально оценена демпфирующая способность канатного подвеса груза при поперечных колебаниях и в результате обработки данных натурных исследований методом наименьших квадратов получена эмпирическая зависимость для определения логарифмических декрементов колебаний.

В пятой главе диссертации рассмотрен вопрос об автоматическом управлении приводом механизма передвижения крановой тележки с целью гашения колебаний груза. Проведенный обзор литературных источников показал, что для кранов, особенно работающих на открытом воздухе, когда до начала работы автоматической системы для гашения колебаний груза его положение заранее неизвестно, возникает задача синтеза оптимального управления. В этом случае применение вычислительных методов, эффективных для построения программных управлений, затруднено. Поэтому в настоящей работе используется подход, предполагающий построение на основе точных решений некоторых квазиоптимальных законов управления, простых для практической реализации.

Для синтеза оптимального управления приводом механизма передвижения крановой тележки с канатным подвесом груза рассмотрено дифференциальное уравнение движения центра масс груза относительно движущейся тележки:

$$\ddot{x}_Г + 2\delta\dot{x}_Г + \lambda_x^2 x_Г = u , \quad (15)$$

где u - вещественный параметр, подчиненный условию $|u| < \bar{u}$. Ограничения на управляющий параметр определяются естественными требованиями к нор-

13

мальной работе механизма - условию отсутствия проскальзывания колес тележки по рельсам, ограничению нагрузок на конструкцию. Задача ставится следующим образом: найти оптимальное управление u для системы вида (15) при ограничениях $u \leq \bar{u}$, которое переводило бы систему из заданного начального положения в начало координат при минимизации функционала от положительно определенной квадратичной формы

$$J = \int_0^T (x_\Gamma^2 + a\dot{x}_\Gamma^2 + cu^2) dt,$$

где $a \geq 0$, $c > 0$ - весовые коэффициенты, характеризующие значимость каждой из составляющих J , выбор которых сам по себе является непростой задачей.

Решение поставленной задачи получено А.Н.Орловым в виде:

$$u = \begin{cases} k_1 x_\Gamma + k_2 \dot{x}_\Gamma & \text{при } |u| < \bar{u}, \\ \bar{u} & \text{при } |u| \geq \bar{u}, \end{cases} \quad (16)$$

где

$$k_1 = \lambda_x^2 - \sqrt{\lambda_x^4 + \frac{1}{c}}, \quad k_2 = 2\delta_x - \sqrt{4\delta_x^2 + \frac{a}{c} - 2k_1}.$$

На основе оптимального управления (16) разработана на уровне изобретения [4] функциональная схема устройства для управления приводом механизма передвижения крановой тележки с целью гашения колебаний груза, построенная на основе элементов цифровой вычислительной техники.

При построении математической модели управляемого движения тележки с грузом на канатном подвесе полагалось, что на механизме передвижения тележки установлены двигатели постоянного тока независимого возбуждения. Использовались полученные в диссертации уравнения движения механической части системы тележка-груз и электрической части в виде динамической характеристики привода. При построении обратной связи по напряжению использовалось выражение (16), где $u = \ddot{x}_\Gamma$ - ускорение движущейся тележки, $\bar{u} = [\ddot{x}_\Gamma]$ - допускаемое из условия отсутствия ослабления подъемных канатов ускорение.

На рис. 5 представлены результаты моделирования работы системы автоматического управления приводом механизма передвижения крановой тележки при ее включении для двух различных вариантов положений груза. Функция управления не зависит от режимов движения тележки, и управление приводом может накладываться на программный режим движения или включаться при стоящей тележке в случае появления раскачиваний груза.

Систему для гашения колебаний груза можно использовать и для кранов стрелового типа.

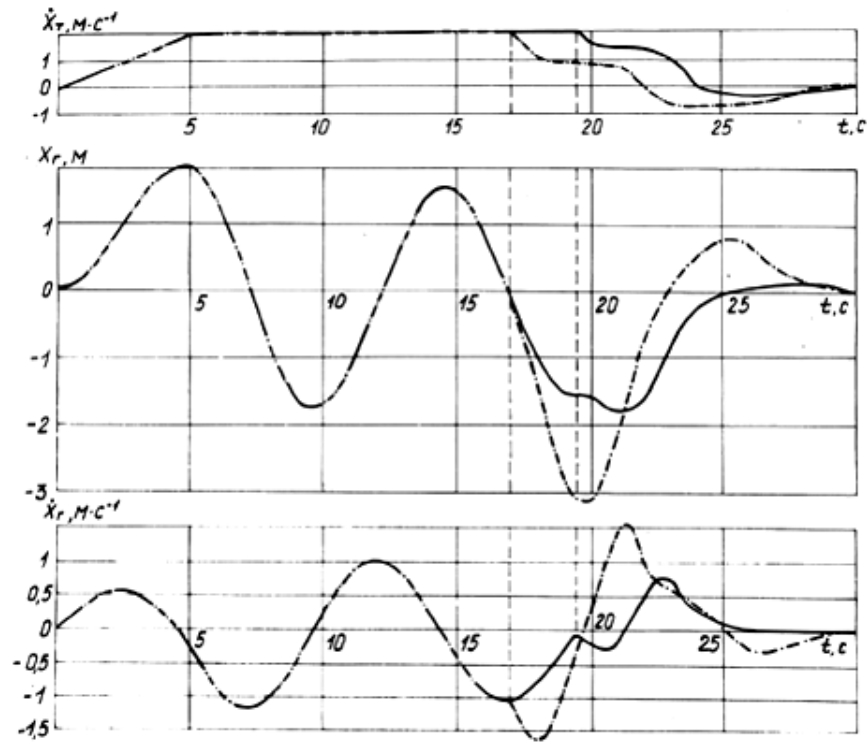


Рис. 5

В приложениях к диссертации приведены формулы для определения элементов матриц $[c]_{OC}$, математические модели кранов стрелового и мостового типов при различных вариантах работы их механизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы по работе сводятся к следующему:

1. Разработан метод построения математических моделей свободных колебаний грузов на пространственных канатных подвесах с учетом возможного ослабления подъемных канатов.

2. Для наиболее распространенных на высокоскоростных перегрузочных кранах мостового и стрелового типов траверсной и грейферной схем подвесов

15

груза получены формулы для определения натяжений в подъемных канатах и элементов квазиупругих матриц и векторов обобщенных сил для различных случаев ослабления канатов.

3. Разработана методика построения обобщенных математических моделей грузоподъемных кранов с грузом на пространственном канатном подвесе, реа-

лизованная для кранов мостового и стрелового типов. Получены обобщенные математические модели кранов в виде механизмов с жесткими звеньями и грузом на пространственном канатном подвесе, которые позволяют проводить исследования при любых схемах подвесов груза с учетом ослабления подъемных канатов и конструктивно-компоновочных исполнениях систем изменения вылета и крановых механизмов.

4. Разработаны алгоритмы и программы определения точек устойчивого положения равновесия системы изменения вылета стреловых кранов и исследования аварийных режимов работы - отказа тормозов и обрыва рейки.

5. Получены расчетные формулы для определения углов отклонения канатов в плоскости и из плоскости стреловой системы крана при работе механизма вращения крана.

6. Впервые поставлена и решена задача определения динамических нагрузок в подъемных канатах при поперечных колебаниях груза. Показано, что даже при нормальной работе механизмов горизонтального перемещения груза они обычно выше, чем при работе механизма подъема, а при неблагоприятных условиях могут возникать ослабления одного или нескольких подъемных канатов. Этот фактор следует учитывать при назначении запасов прочности подъемных канатов, так как динамические растягивающие нагрузки существенно сказываются на их долговечности при работе на вращающихся блоках.

7. Впервые получены аналитические выражения для определения динамических нагрузок в подъемных канатах при поперечных колебаниях груза и допускаемого из условия отсутствия ослаблений подъемных канатов ускорения крановой тележки при разгонах и торможениях.

8. На основе сравнения результатов натурных исследований причального контейнерного перегружателя и расчета на ЭВМ по разработанным программам доказана правомерность принятых при построении моделей допущений.

9. Экспериментально оценена демпфирующая способность груза на траверсном подвесе при его поперечных колебаниях и получена эмпирическая формула для определения величин логарифмических декрементов колебаний.

10. На основе известного оптимального управления разработана на уровне изобретения функциональная схема устройства для управления приводом механизма передвижения крановой тележки с целью гашения колебаний груза, построенная на основе элементов цифровой вычислительной техники.

16

11. Разработана математическая модель движения тележки с гибким подвесом груза и системой для гашения его колебаний, которая позволяет осуществить управление приводом механизма передвижения крановой тележки согласно алгоритму управления, обеспечивающего эффективное гашение колебаний груза. Функция управления не зависит от режимов движения тележки и управление

приводом может накладываться на программный режим движения или включаться при стоящей тележке в случае появления раскачиваний груза. Систему для гашения колебаний груза можно использовать и для кранов стрелового типа.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Орлов А.Н., Флюгель Ф. Динамические нагрузки в подъемных канатах при поперечных колебаниях груза // Стальные канаты: эксплуатация, динамика. - Киев.: Лыбидь, 1991. - С. 173 - 181.

2. Флюгель Ф. Состояние и тенденции развития оптимального управления крановыми механизмами с целью гашения колебаний груза на гибком подвесе / С.-Петербург. гос. техн. ун-т. - СПб, 1994. - 20 с. - Библиогр.: 91 назв. - Деп. в ВИНТИ 22.03.94, № 676 - В94.

3. Исследование аварийных режимов работы системы изменения вылета порталных кранов / Д. Е. Бортяков, Д. Вюнше, А. Н. Орлов, Ф. Флюгель; С.-Петербург. гос. техн. ун-т. - СПб, 1994. - 9 с.; 4 ил. - Библиогр.: 4 наз. - Деп. в ВИНТИ 22.03.94, № 677 - В94.

4. Патент № 2013356. Устройство для автоматического управления механизмом передвижения крановой тележки / А. Н. Орлов, А. И. Пабат, Ф. Флюгель. - - Изобретения. - 1994. - № 10. - С. 62.

5. Флюгель Ф. Математические модели крановых подвесов груза с учетом ослабления подъемных канатов // Тез. докл. Всеросс. научн.-техн. конф. "Новое в подъемно - транспортной технике". - М., 1994. - С. 44.

6. Орлов А.Н., Флюгель Ф. Обобщенная математическая модель грузоподъемных кранов // Тез. докл. Всеросс. научн.-техн. конф. "Новое в подъемно - транспортной технике". - М., 1994. - С. 43.

7. Орлов А.Н., Флюгель Ф. Автоматическое управление приводом механизма передвижения крановой тележки с целью гашения колебаний груза // Тез. докл. Респ. научн.-техн. конф. "Строительные и дорожные машины и их использование в современных условиях". - СПб., 1995. - С. 113 - 114.

8. Орлов А.Н., Флюгель Ф. Обобщенная математическая модель стреловых кранов // В сб. "Управление технологическими системами". - Труды С.-Петербурга. гос. техн. ун-та. - СПб., 1995. - № 455. - С. 66 - 76.

17

9. Орлов А.Н., Флюгель Ф. Обобщенная математическая модель мостовых кранов // В сб. "Динамика, прочность и надежность технологических машин". - Труды С.-Петербурга. гос. техн. ун-та. - СПб., 1998. - № 478. - С. 3 - 8.

Исправления:

1. На стр. 13 в формуле (15) вместо δ должно быть δ_x .
2. На стр. 13 в предпоследней строке в формуле должен быть знак “меньше либо равно”: $|u| \leq \bar{u}$.