

ностям реализации параметров подвесок транспортных машин и подтверждают правомерность применения энергии переходного процесса, возбуждаемого единичной ступенчатой функцией, в качестве оценки систем поддрессирования и целевой функции их оптимизации.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1]. Динамика системы дорога — шина — автомобиль — водитель / Под ред. А. А. Хачатурова.— М.: Машиностроение, 1976.— 535 с. [2]. Математические основы теории автоматического регулирования / Под ред. Б. К. Чемоданова.— М.: Высш. школа, 1977.— 366 с. [3]. Ротенберг Р. В. Подвеска автомобиля.— М.: Машиностроение, 1972.— 392 с.

Поступила 19 января 1989 г.

УДК 539.3

## К ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРУГОГО МАНИПУЛЯТОРА

М. В. КОНДАКОВ

Московский лесотехнический институт

Лесное машиностроение является уже традиционной областью использования манипуляторов большой грузоподъемности в составе валочно-пакетирующих, валочно-трелевочных и других машин. Однако зачастую эти манипуляторы не отвечают современным требованиям надежности и долговечности. Одна из причин этого кроется в неудовлетворительной обработке динамической прочности конструкции на этапах проектных и опытно-конструкторских работ [3]. Преобладающие в лесном машиностроении методы экспериментальной отработки прочности оказываются малоэффективными на стадии проектирования нового изделия.

Специфической особенностью функционирования манипуляторов лесных машин является их интенсивное динамическое нагружение, обусловленное, в основном, двумя факторами: большими инерционными характеристиками (массой и моментом инерции) переносимых грузов (дерева, хлыста) и достаточно высокими скоростями манипулирования.

Анализ динамики конструкции на стадии проектирования возможен только на основе расчетных методов. В работах [1, 2] приведена математическая модель конструкции манипулятора при переходных процессах, когда интенсивность нагружения достигает, как правило, экстремальных значений, определяющих уровень прочности изделия. В настоящей статье оценивается точность разработанных методов расчета на основе сравнения с данными экспериментальных исследований.

В основу расчетной схемы манипулятора положена балочная модель [1] с переменными по длине массово-жесткостными характеристиками и сосредоточенными инерционными и жесткостными элементами, позволяющими описать конструктивные особенности реальных систем. Для балочных элементов учитываются упругие продольные и изгибные деформации, а также, на основе гипотез С. П. Тимошенко [4], деформации сдвига и инерция поворота поперечного сечения.

Динамическое поведение упругого манипулятора сводится к смешанной задаче математической физики для уравнения

$$\{M\} \frac{\partial^2 \vec{y}}{\partial t^2} + L \vec{y} = \vec{F}, \quad (1)$$

где линейный оператор  $L$  имеет структуру

$$L = [A] \frac{\partial^2}{\partial x^2} + [B] \frac{\partial}{\partial x} + [C]. \quad (2)$$

В случае плоского движения манипулятора, сопровождающегося связанными продольно-поперечными колебаниями, вектор решения:

$$\vec{y} = (u, w, \psi)^T, \quad (3)$$

где  $u, w, \psi$  — соответственно продольное, поперечное и угловое перемещение сечений конструкции.

Используя обобщенный метод Галеркина, решение уравнения (1) можно представить [2] в виде ряда:

$$\vec{y} = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \vec{\xi}_i(x), \quad (4)$$

где в качестве базиса разложения  $\vec{\xi}_i(x)$  выбрано пространство собственных векторов оператора  $L$ , определяемых уравнением:

$$-\lambda_i^2 [M] \vec{\xi}_i + L \vec{\xi}_i = 0. \quad (5)$$

Процедура метода Галеркина позволяет перейти от смешанной задачи (1) к задаче Коши для бесконечномерной системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно обобщенных координат  $a_i(t)$ . При учете конструкционного демпфирования в рамках гипотезы вязкого трения, описывающая система уравнений принимает вид [2]:

$$\ddot{a}_n + 2b_n \dot{a}_n + \lambda_n^2 a_n = f_n, \quad n = 1, 2, \dots, \infty, \quad (6)$$

где  $b_n = h_n \lambda_n (2\pi)^{-1}$ ,  $h_n$  — декремент колебаний по  $n$ -му тону.

Особенностью формулировки задачи динамики [2] являются слабые ограничения, накладываемые на гладкость функций внешних сил  $\vec{F}$  (1). От них требуется только интегрируемость, по крайней мере в смысле Лебега. Следовательно, внешние силы можно задавать не только недифференцируемыми функциями, но и функциями, имеющими конечное число точек разрыва первого рода.

Уравнения движения (6) использовали для построения алгоритма расчета переходных процессов в конструкции манипулятора под действием заданных внешних сил (которые могут быть и управляющими усилиями приводов). Последовательность работы алгоритма можно представить следующими этапами:

1) описание топологии расчетной модели манипулятора на основе каталогизированных типовых элементов [1];

2) автоматическое формирование расчетной схемы;

3) решение проблемы собственных значений (3) и отыскание частот  $\lambda_i$  и форм  $\vec{\xi}_i$  свободных колебаний системы;

4) задание внешнего воздействия  $\vec{F}(x, t)$ ;

5) автоматическое формирование уравнений движения (6) в терминах обобщенных координат  $a_i(t)$ ;

6) интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка (6);

7) определение вектора перемещений системы  $\vec{y}$  (3).

Алгоритм решения задачи динамики реализован в вычислительной среде ФОРТРАН-ЕС на ВЦ МЛТИ. В рассматриваемом алгоритме определение перемещений упругой конструкции является основным результатом решения задачи динамики. В дальнейшем эти перемещения можно интерпретировать в терминах внутренних силовых факторов для определения нагрузок в конструкции или в терминах напряженно-деформированного состояния для определения запасов прочности.

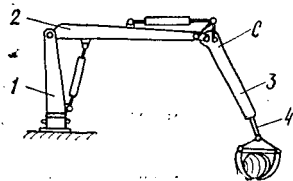


Рис. 1. Компоновочная схема манипулятора

Основные технические характеристики манипулятора: грузовой момент —  $50 \text{ кН} \cdot \text{м}$ ; масса —  $1500 \text{ кг}$ ; минимальный вылет груза —  $1,5 \text{ м}$ , максимальный —  $6 \text{ м}$ . Конструктивная схема типична для систем аналогичного класса и включает колонну 1, стрелу 2, рукоятку 3 с телескопическим удлинителем 4.

Расчетную модель манипулятора набирали из типовых элементов [1], характеристики которых определяли по данным рабочих чертежей. Она содержала одиннадцать балочных элементов, схематизирующих переменные по длине массово-жесткостные характеристики звеньев манипулятора, и шесть сосредоточенных элементов, схематизирующих шарнирные соединения и усиливающие элементы конструкции.

Пример расчета переходного процесса, возникающего в конструкции манипулятора, иллюстрируется графиками рис. 2—4. Рассмотрен случай подъема груза массой  $450 \text{ кг}$  рукояткой при горизонтальном положении стрелы, который соответствует типовым ресурсным испытаниям системы. При этом приведенный грузовой момент составляет примерно  $50\%$  от максимально допустимого техническими характеристиками. В ходе эксперимента записывали осциллограммы напряжений для различных сечений конструкции и осциллограммы изменения давления в гидроцилиндре привода.

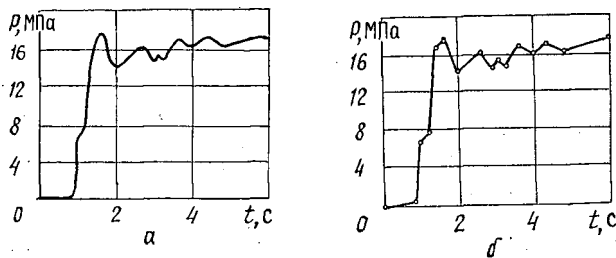


Рис. 2. Изменение давления в гидроцилиндре привода рукоятки: а — экспериментальная кривая; б — кусочно-линейная аппроксимация для расчета движения

На рис. 2, а приведен график изменения давления в гидроцилиндре привода рукоятки для момента начала движения. Давление в тракте гидроцилиндра возрастает скачком от нулевого до номинального значения, равного  $16 \text{ МПа}$ . Для расчета движения график давления в гидроцилиндре аппроксимировали кусочно-линейной зависимостью (рис. 2, б) и пересчитывали в управляющее усилие на штоке. Таблицу, связывающую усилие в узловых точках с текущим моментом времени, вводили в память ЭВМ в качестве исходной информации.

Измеренные в эксперименте деформации и рассчитанные на ЭВМ значения внутренних силовых факторов интерпретировали в терминах напряжений. На графиках рис. 3 показано изменение напряжений в точке С (рис. 1) рукоятки в месте ее крепления к стреле. Кривая на рис. 3, а получена на осциллограмме. Кривая на рис. 3, б построена по данным расчета переходного процесса на ЭВМ.

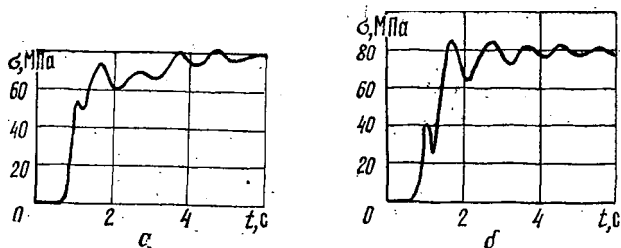


Рис. 3. Изменение напряжений в точке С (рис. 1): а — эксперимент; б — расчет

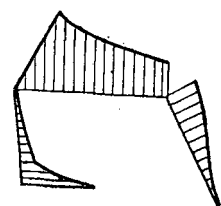


Рис. 4. Эпюры экстремальных изгибающих моментов за время переходного процесса

Основной вклад в напряженно-деформированное состояние конструкции манипулятора при плоском движении вносят изгибные деформации. На рис. 4 представлена расчетная эпюра экстремальных изгибающих моментов, реализующихся в сечениях конструкции за время переходного процесса.

Результаты расчета, выраженные в терминах экстремальных значений напряжений, возникающих в элементах конструкции манипулятора за время переходного процесса, позволяют судить о запасах прочности отдельных элементов и конструкции в целом по критериям разрушающих напряжений. Кроме того, частотные характеристики динамических процессов дают возможность оценить запас длительной прочности по критериям усталостных напряжений для рассматриваемого случая функционирования.

Сопоставление результатов эксперимента и расчета позволяет сделать вывод о достаточно хорошем соответствии между экспериментальными и расчетными результатами.

Динамическая модель упругого манипулятора позволяет уже на этапе рабочего проектирования с достаточной точностью оценить запасы прочности как отдельных узлов, так и конструкции в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Кондаков М. В. Расчетная схема упругого манипулятора // Лесн. журн.— 1988.— № 6.— С. 36—41.— (Изв. высш. учеб. заведений). [2]. Кондаков М. В. К расчету динамического нагружения конструкции манипулятора при переходных процессах // Лесн. журн.— 1989.— № 2.— С. 38—43.— (Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Кондаков М. В., Пилюттик А. Г. Каким быть завтрашнему машиностроению отрасли? // Лесн. журн.— 1987.— № 2.— С. 8—14.— (Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Тимошенко С. П. Теория колебаний в инженерном деле.— М.; Л.: ГНТИ, 1932.— 344 с.

Поступила 20 июня 1988 г.

УДК 630\*383.2.001.5

### ПРОМЕРЗАНИЕ ЗИМНИХ ДОРОГ НА БОЛОТАХ

В. С. МОРОЗОВ  
СевНИИП

Зимние автомобильные лесовозные дороги широко применяют при освоении лесных массивов, расположенных на слабых и переувлажненных грунтах. На значительной части своей длины зимние дороги проходят по заболоченным участкам и болотам. Низкая несущая способность торфа, позднее замерзание и раннее оттаивание таких участков