

Динамика конструкций и сооружений

ПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ОБРАТНОГО МАЯТНИКА

М.А. КОВЫРЯГИН *канд. техн. наук, доц.*

Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета

Широко используемый в России способ демпфирования колебаний высотных сооружений с использованием обратного маятника, разработанный Остроумовым Б.В. [1], позволяет значительно уменьшить амплитуду колебаний таких объектов как дымовые трубы [2]. При таком способе активного управления колебаниями надежность процесса зависит от постоянства механических свойств конструкции и стабильности ветровых и иных воздействий на нее. В случае изменения этих свойств, например за счет появления люфтов в резьбовых соединениях конструкции, появления дополнительного оборудования на сооружении, незначительной перестройки самой конструкции, а также отклонений от известной ветровой нагрузки или обледенения требуется существенная и частая подстройка устройства. Возникает необходимость автоматизации регулирования параметров самого обратного маятника. Причем для высотных сооружений с переменной структурой (различным в течение дня количеством людей, грузов, жидкости) это требование становится обязательным.

Известны различные способы управления динамическим поведением конструкций как в пассивном, так и в активном режимах [3, 4]. В рассматриваемой задаче возможно использование гибридной и активной системы управления.

При гибридной схеме регулирование определяющих рабочие частоты (массы и длины подвеса) параметров производится при необходимости, то есть в случаях предполагаемого изменения механических свойств конструкции или возможности экстремального нагружения во время бури, снегопада. Активная система, требующая непрерывного слежения за динамическим процессом, требует непрерывного потребления энергии и дороже в исполнении.

Рассмотрим принципиальную возможность регулирования параметров обратного маятника. В соответствии с [1] дифференциальные уравнения колебаний сооружения и гасителя имеют вид:

$$\left(1 + \frac{\gamma_1}{\omega_1} \cdot \frac{\partial}{\partial t}\right) \cdot \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \cdot \left(EJ_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\right] + m_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - C_x \cdot \frac{rh_x V_x^2}{2} + \delta(x-l) \cdot m_2 \cdot \frac{d^2(y+w_l)}{dt^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d^2(y+w_l)}{dt^2} + \mu_0 \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{g}{m_1+m_2} \cdot \left(\frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2}\right) \cdot y = 0. \quad (2)$$

где: m_x – погонная масса сооружения; EJ_x – изгибная жесткость сооружения; γ_1 – коэффициент трения сооружения; ω_1 – частота собственных колебаний сооружения по первой форме; w – перемещение сооружения в произвольном сечении; w_l – перемещение вершины сооружения; $m_2 = m_1 + m_2$ – полная инерционная масса гасителя колебаний; m_1 – нижняя (наружная) масса гасителя колебаний;

m_2 – верхняя (внутренняя) масса гасителя колебаний; μ_0 – коэффициент вязкого трения (сопротивления) гасителя;

$\sqrt{\frac{g}{m_1 + m_2} \cdot \left(\frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2} \right)}$ – парциальная частота колебаний гасителя в виде перевернутого маятника;

l – высота сооружения; C_x – коэффициент лобового сопротивления сооружения; r – плотность воздуха; h_x – поперечный размер сечения (миделево сечение); V_x – скорость ветра.

Оптимальная настройка гасителя находится по формуле [1]:

$$f_{opt}^2 = \frac{g}{\omega_1^2 (m_1 + m_2)} \cdot \left(\frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2} \right) = \frac{1}{1 + \nu}. \quad (3)$$

Очевидно, что регулирование величины оптимальной частоты можно за счет изменения любой массы или длины подвесов гасителя колебаний.

Проведенные численные исследования показали, что при длинах подвесов равных $l_1=1$ м., $l_2=0,5$ м. зависимость $f_{opt}^2 \cdot \omega_1^2 = F(m_1, m_2)$ имеет вид, изображенный на рис.1, а в диапазоне изменения масс от 0,1 до 1 единиц массы. Здесь по правой оси отложена первая масса, а по левой – вторая.

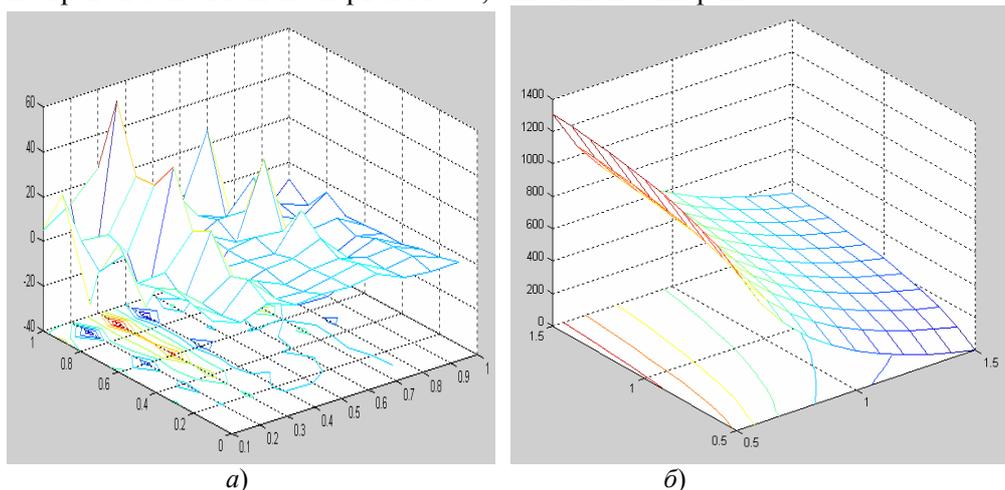


Рис.1 Зависимость произведения квадратов частот возмущения и конструкции от
а) изменения масс гасителя колебаний; б) изменения длин подвесов масс

Если принять массы $m_1 = 150$ кг и $m_2 = 50$ кг, то зависимость произведения квадратов частот возмущения и конструкции от изменения длин подвеса масс примет вид графика, изображенного на рис.1б. На нем по оси x откладывается длина l_1 , а по оси l_2 .

Существенная нелинейность исследуемых зависимостей дает основание рекомендовать к использованию именно второй из ранее описанных способов подстройки частоты обратного маятника – активный. При этом система подстройки частоты должна состоять из трех элементов [4]: датчиков колебаний, анализатора, исполнительного механизма.

Рассмотрим вопрос о датчиках. Известно, что при отклонении частоты обратного маятника от оптимальной, увеличивается амплитуда колебаний сооружения и амплитуда колебаний маятника [2]. Следовательно, в качестве датчиков можно использовать концевые выключатели, расположенные на траектории

движения масс маятника. Релейный закон работы датчиков амплитуды - концевых выключателей дает следующую логику работы анализатора. Если при изменении регулируемого параметра амплитуда уменьшилась – регулирование прекращается. Если амплитуда не уменьшилась, то необходимо произвести регулировку со сменой знака.

Технически самым сложным вопросом в рассматриваемой задаче является выбор регулируемого параметра. Теоретически таких параметров четыре: две массы и две длины подвеса этих масс. Для выбора регулируемого параметра вновь обратим внимание на графики, изображенные на рис.1 и рис.2. Графики на рис.1 имеют множественные экстремумы, что усложнит логику анализатора с одной стороны и потребует нетривиального решения в изменении масс. Одним из вариантов может служить замена части массы жидкостью.

Поверхность на рис.2 имеет однозначную кривизну, что значительно упростит логику анализатора. Обратим внимание на кривизну поверхности в направлении изменения длин подвесов. В направлении изменения длины первой массы она больше, а в направлении второй – меньше. Следовательно, изменение длины подвеса второй массы будет более «мягко» влиять на колебательный процесс, чем изменение длины подвеса первой массы. Необходимо также принять во внимание, что в существующих гасителях колебаний первая масса разбита на три части, что технически втрое усложняет задачу.

На основании изложенного принимаем в качестве регулируемой величины для подстройки частоты колебаний гасителя длину подвеса второй (меньшей) массы. Технически реализация регулирования длины подвеса может быть представлена в виде гидродомкрата или червячной пары с электродвигателем. При использовании гидродомкрата необходима сложная система вспомогательного оборудования, включающая реверсивный электродвигатель, регулятор потока, плунжерный гидроусилитель, гидроаккумулятор, регулятор давления, блок электронных усилителей, коммутатор, аналого-цифровой и цифровой преобразователи, систему управления [5].

Реалистичнее выглядит в данном случае использование электродвигателя, расположенного по оси нижней массы, перемещающего эту массу с помощью червячной пары на определенное дискретное расстояние, зависящее от продолжительности питания, подаваемого на двигатель. Основным инерционным звеном в данной системе является электродвигатель постоянного тока с усилителем мощности. Однако, расчеты для усилителя $k_y = 1.03$, $\tau_y = 0.114 \text{ сек}$ и двигателя с параметрами:

гателя с параметрами:

$$c_M = 0.2 \text{ н} \cdot \text{м} / \text{а}, \quad c_e = 0.31 \text{ в} \cdot \text{сек},$$

$$J_{\text{дв}} = 0.02 \text{ н} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2, \quad L_{\text{дв}} = 1 \text{ гн},$$

$$R_{\text{дв}} = 2.5 \text{ ом}$$

показывают, что переходные процессы имеют вид, изображенный на рис.2, то есть угловая скорость ω , а следовательно и угол поворота вала электродвигателя φ приводятся в нулевое состояние за 1 сек.

Постоянные времени концевых выключателей и червячной пары равно 0,05 сек. Таким образом, время реагирования такой системы будет равно 1,1 сек, что меньше нижнего значения периода колебаний в 1,5 сек,

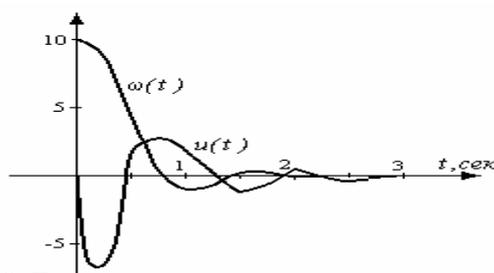


Рис.2. Переходные процессы в системе регулирования длины подвеса массы обратного маятника ($\omega(t)$ - угловая скорость вращения вала электродвигателя, $u(t)$ - функция управления работой двигателя)

ной пары равно 0,05 сек. Таким образом, время реагирования такой системы будет равно 1,1 сек, что меньше нижнего значения периода колебаний в 1,5 сек,

когда предпочтительнее использовать динамические гасители колебаний в виде перевернутого маятника [1].

Заключение

Подстройка оптимальной частоты собственных колебаний динамического гасителя в виде перевернутого маятника возможна с использованием электро-механической дискретной системы автоматического регулирования при гашении автоколебаний высотных сооружений поперек ветрового потока.

Л и т е р а т у р а

1. *Остроумов Б.В.* Гашение автоколебаний высотных сооружений поперек ветрового потока с помощью динамического гасителя колебаний в виде перевернутого маятника/ Б.В.Остроумов// Изв. вузов. Строительство. – 2003. – №2. – С.38-39.

2. *Остроумов Б.В.* Динамические испытания дымовой трубы с гасителем колебаний/ Б.В.Остроумов// Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2003. – №2. – С.9-13.

3. *Овчинников И.Г.* Использование принципов активного управления конструкцией в транспортных сооружениях/ И.Г.Овчинников, М.А.Ковырягин// Транспортное строительство. – 2000. – №6. – С.7-9.

4. *Ковырягин М.А.* Регулирование напряженно-деформированного состояния и динамического поведения элементов конструкций. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. – 138с.

5. *Кузина О.А.* Математическая модель и алгоритм оптимального управления системы активного гашения колебаний высотных сооружений. – Юж-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 1999 – 22с. – Библиогр.: 5 назв. – Деп. в ВИНТИ 01.12.1999, № 3562-В99.

SMALL ADJUSTMENT OF FREQUENCY OSCILLATION OF INVERSE PENDULUM

М.А.Ковырягин

In the article, a theoretical analysis of oscillation of inverse pendulum from main parameters is presented. One parameter for small adjustment is chosen.



МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

В.Н. ШУЛЬГИН*, канд. техн. наук.

В.И. ЛАРИОНОВ**, д-р техн. наук.

* Академия Государственной противопожарной службы, Москва

** Центр исследований экстремальных ситуаций, Москва

В этом методе конструкцию сводят к системе с одной степенью свободы путем приведения дифференциального уравнения движения элемента 4-го порядка в частных производных к решению дифференциальных уравнений 2-го порядка. Решение уравнения движения балки представляем в виде произведения двух деформаций

$$y(x,t) = pF(x)T(t), \quad (1)$$

где $F(x)$ – функция, равная перемещениям балки от действия статической нагрузки, $T(t)$ – функция, описывающая перемещение конструкций во времени; p –