

УДК 534.121

**ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЕЙ ИЗГИБНЫХ ВОЛН В РЕБРИСТЫХ ПЛАСТИНАХ**

*В. В. Моисеев, А. С. Никифоров*

Для исследований нестационарных полей изгибных волн в ребристых пластинах может быть применено аналоговое моделирование с использованием схем, состоящих из элементов *RC*. Результаты измерений на модели сравниваются с натурными данными.

Изучению стационарных полей деформации волн, в том числе изгибных, в неоднородных пластинах посвящено большое число работ. Исследование этих полей производится обычно в предположении об их диффузности с помощью энергетических методов, в частности, развитых в свое время Вестфалем [1]. Им же указано на возможность моделирования упомянутых полей путем построения аналоговой электрической схемы. Эти методы, равно как и указанное моделирование, могут быть использованы для рассмотрения нестационарных полей упругих волн в неоднородных и, в частности, в ребристых пластинах.

Согласно методу Вестфалья, для потока энергии изгибных волн  $q_k$ , имеющего место в каждом элементе структуры, состоящей из элементов в виде однородных пластин, можно в случае нестационарного процесса написать следующее уравнение:

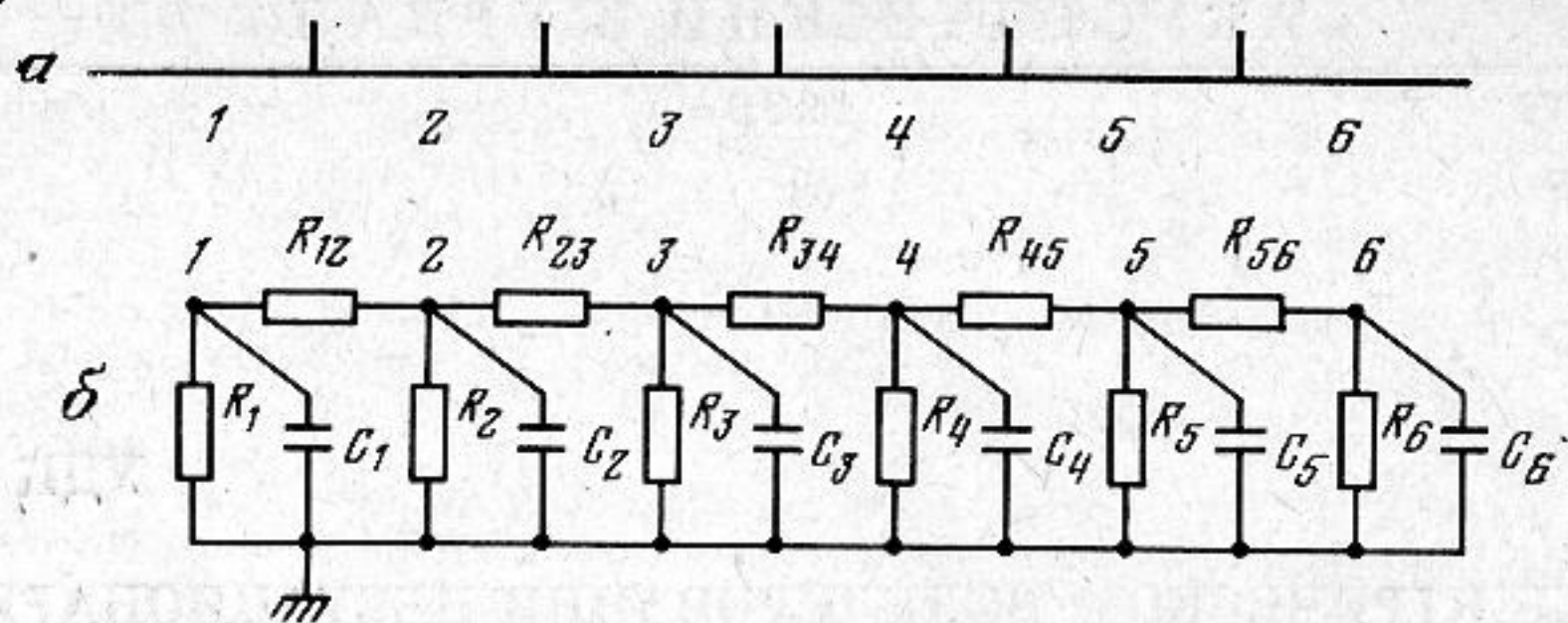
$$(1) \quad \frac{S_k}{c_k} \frac{\partial q_k}{\partial t} = W_k + \sum_{i=1}^n \alpha_{ik} q_k - \left( \beta_k + \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} \right) q_k,$$

где  $S_k$  — площадь элемента  $k$ ,  $W_k$  — мощность источника возбуждения элемента  $k$ ,  $t$  — время,  $c_k$  — скорость переноса энергии изгибных волн в элементе  $k$ ,  $\alpha_{ik}$ ,  $\alpha_{ki}$  — коэффициенты передачи энергии изгибных волн из элемента  $i$  в элемент  $k$  и в обратном направлении ( $\alpha_{ik} = \alpha_{ki} = 0$ , если элементы  $i$  и  $k$  не имеют непосредственного контакта и если  $i = k$ ),  $\beta_k = \omega S_k \eta_k$ . Далее,  $\beta_k$  — коэффициент поглощения энергии изгибных волн в элементе  $k$ ,  $\eta_k$  — коэффициент потерь энергии изгибных волн в элементе  $k$ . Величины  $q_k$  и  $W_k$  являются функциями времени. Если предположить характер поля изгибных волн в элементах структуры диффузным, то величина  $q_k$  постоянна в пределах элемента  $k$ , а коэффициент  $\alpha_{ik} = L_{ik} \tau_{ik} \pi^{-1}$  ( $L_{ik}$  — периметр линии соединения элементов  $i$  и  $k$ ,  $\tau_{ik}$  — коэффициент передачи энергии диффузного поля изгибных волн через соединение элементов  $i$  и  $k$ ) для пластин, разделенных ребром жесткости,  $\tau_{ik} = 0,25$ .

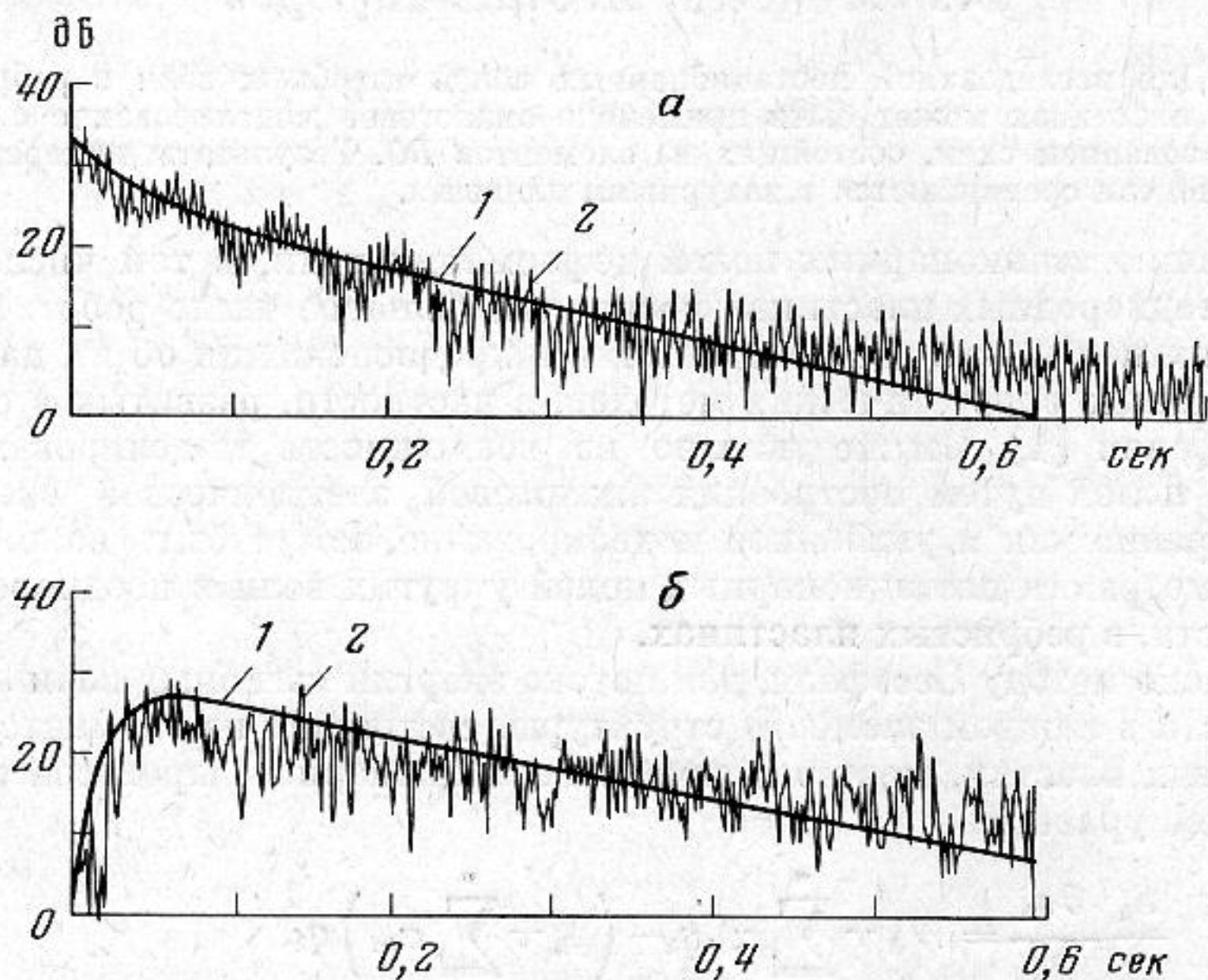
Решение системы уравнений (1) для структуры из  $n$  элементов легко произвести с помощью ЭВМ или, как предлагает Вестфаль, с помощью аналоговой, модели, состоящей из элементов активного сопротивления  $R$  и электрической емкости  $C$ . Принцип построения такой модели основан на аналогии уравнения (1) и уравнения Кирхгофа для электрической схемы, состоящей из элементов  $R$  и  $C$ . Величины этих элементов равны [1]:

$$(2) \quad R_k = \frac{a}{\beta_k}, \quad R_{ik} = \frac{a}{\alpha_{ik}}, \quad C_k = \frac{aS_k}{c_k},$$





Фиг. 1. Конструкция ребристой пластины (а) и ее электрическая модель (б)



Фиг. 2. Зависимость от времени энергии изгибных волн в ребристой пластине и напряжения в ее электрической модели (а — в ячейке 1; б — в ячейке 6). 1 — модель; 2 — пластина

где  $a$  — произвольный коэффициент пропорциональности. Нетрудно убедиться, что при указанной аналогии уравнений  $q$  является аналогом электрического напряжения,  $W$  — электрического тока, а  $\alpha$  и  $\beta$  — электрических проводимостей.

Проверка возможности электрического моделирования нестационарных полей изгибных волн в структурах, состоящих из однородных пластин, была произведена на ребристой пластине, представляющей собой полосу с установленными на ней эквидистантными ребрами жесткости. Размеры полосы были выбраны равными  $1200 \times 300 \times 4$  мм<sup>3</sup>. На ней были установлены 5 поперечных ребер жесткости, разделяющих ее на 6 одинаковых ячеек. Коэффициент потерь в конструкции составлял около  $5 \cdot 10^{-4}$ .

Конструкция описанной ребристой пластины и ее электрическая аналоговая модель показаны на фиг. 1. При выборе элементов этой модели коэффициент  $a$  принят равным  $10^{-2}$ , в соответствии с чем для частоты 1 кГц  $R_{ik} = 1$  кОм,  $R_k = 6,5$  кОм,  $C_k = 5$  мкф.

На фиг. 2 приведены результаты измерений изменения во времени напряжения (аналога потока энергии изгибных волн) в точках 1 и 6 аналоговой модели при подаче между точкой 1 и землей однополярного импульса напряжения длительностью около 1 мс. Видно, что в точке 1 напря-



жение после резкого возрастания при подаче импульса постепенно спадает. Это происходит вследствие разрядки электрической емкости  $C_1$  через сопротивление  $R_1$  (аналог поглощения энергии изгибных волн в ячейке 1) и через сопротивление  $R_{12}$  (аналог утечки энергии изгибных волн из ячейки 1 в другие ячейки ребристой пластины). Напряжение между точкой 6 и землей некоторое время (значительно большее 1 мс) возрастает вследствие зарядки емкости  $C_6$  током разрядки емкостей  $C_1-C_5$  (аналог энергии изгибных волн, поступающей в ячейку из других ячеек ребристой пластины), а затем постепенно уменьшается в результате разрядки емкости  $C_6$  через сопротивление  $R_6$  (аналог поглощения энергии изгибных волн в ячейке 6) и сопротивление  $R_{56}$  (аналог утечки энергии изгибных волн из ячейки 6 в другие ячейки ребристой пластины).

На фиг. 2 показаны также результаты экспериментального исследования нестационарного поля изгибных волн в описанной выше ребристой пластине, подвешенной для уменьшения влияния утечки энергии через крепления на резиновых жгутах. Одна из крайних ячеек ребристой пластины (определим ее индексом 1) возбуждалась одиночным импульсом от удара молотком.

С помощью узкополосного анализатора и самописца регистрировались зависимости от времени энергии изгибных колебаний, имеющих место в полосе  $1/3$  октавы со средней частотой 1 кГц. Видно, что импульсы изгибных колебаний имеют синусоидальное заполнение указанной частоты. Максимумы этой синусоиды практически совпадают с результатами измерений огибающей импульсов на аналоговой электрической модели исследуемой структуры.

Анализ полученных результатов показывает, в частности, что длительность импульса энергии изгибных колебаний, определенная по уровню 0,5 от максимальной, возрастает по мере удаления от возбуждаемой ячейки ребристой пластины. Это объясняется в данном случае не дисперсией скорости распространения изгибных волн, а запаздыванием многократно отраженных от ребер жесткости волн относительно прямой волны, поступающей в рассматриваемую ячейку из возбуждаемой.

Из фиг. 2 видно, что по прошествии некоторого времени (в данном случае  $t_0 \sim 1$  мс) плотности энергии в ячейках 1 и 6 сравниваются и дальнейшее их изменение происходит по одинаковому закону.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Westphal W. Ausbreitung von Körperschall in Gebäuden. Akustische Beihefte, 1957, 1, 1, 335-340.

Поступила  
25 января 1980 г.