

**С.В. Шумарин**, аспирант; **Е.Н. Талицкий**, д-р.техн.наук, проф.

Владимирский государственный университет

ental@vpti.vladimir.ru

## **Оптимизация виброзащиты электронной аппаратуры методом частотной отстройки**

*Анализируются возможные способы виброзащиты электронной аппаратуры методом частотной отстройки. Предлагается алгоритм оптимизации массогабаритных показателей аппаратуры при частотной отстройке.*

**Ключевые слова:** электронная аппаратура, виброзащита, частотная отстройка, алгоритм.

### **Введение**

Многие виды электронной аппаратуры (ЭА), устанавливаемой на подвижных объектах – самолетах, бронетранспортерах, ракетах и т.д. подвергаются воздействию вибраций в широком диапазоне частот. Это приводит к возникновению резонансных колебаний, таких широко распространенных элементов конструкций ЭА, как ячейки, состоящие из электромонтажных плат с установленными на них электрорадиоэлементами (ЭРЭ). Виброперегрузки ЭРЭ увеличиваются при этом в десятки раз, что вызывает значительное возрастание интенсивности отказов как за счет механических разрушений элементов конструкций, так и за счет искажения параметров электрических сигналов. В этом случае виброзащита ЭА, часто сводится к устранению резонансных колебаний ячеек.

В работе [1] рассмотрен алгоритм проектирования виброзащиты ЭА, в соответствии с которым, если верхняя граница диапазона воздействую-

щей вибрации не превышает 500 Гц, устранять резонансные колебания предпочтительнее частотной отстройкой (ЧО), так как она конструктивно и технологически проста по сравнению с остальными способами виброзащиты. Применение ЧО характерно для многих видов ЭА, используемой на высокоскоростных транспортных средствах на гусеничном ходу.

Для обеспечения ЧО первая собственная частота колебаний (СЧК) ячеек ЭА должна не менее чем на 30% превышать максимальную частоту возбуждения [2]. Так как это достигается повышением жесткости конструкции за счет увеличения толщины плат, применения ребер жесткости и т.д., масса ячеек значительно увеличивается и часто превосходит допустимые нормы, что вызывает необходимость ее минимизации.

### **Особенности применения способов частотной отстройки**

Повышать СЧК ячеек ЭА можно усилением жесткости крепления, например, установкой дополнительных точек крепления (ДТК), уменьшением площади ячейки, увеличением толщины электроmontажной платы, применением ребра жесткости или дополнительного слоя из легкого, но жесткого пенопласта типа ППУ-305А. Как показано в работе [3] последний способ позволяет существенно повышать СЧК. Если одним способом не удастся устранить резонансы ячеек, то используют несколько способов одновременно.

Каждый способ, повышая СЧК, увеличивает суммарную массу ячеек и в определенной степени ухудшает их конструктивные параметры, а, следовательно, имеет свои ограничения. Так, уменьшение площади электроmontажных плат ограничивается схемой электрической принципиальной и часто необходимостью применения типовых конструкций блоков ЭА, толщина – номенклатурой используемых материалов. Нанесение пенопластов ухудшает ремонтпригодность и теплообмен в ЭА.

Установка ребер жесткости усложняет конструкции ЭА и зависит от применяемого способа крепления. Повышение жесткости крепления до-

стигается также введением ДТК, что расширяет возможные варианты установки ребер, но уменьшает площадь для электромонтажа и часто невозможно из-за конструктивных особенностей блоков.

В работе [4] на примере связной аппаратуры показано, что с учетом большинства факторов ЧО целесообразно начинать с применения ребер жесткости, затем использовать ДТК. Если и в этом случае обеспечить ЧО не удастся, то нужно увеличивать толщину платы, потом уменьшать ее площадь и применять дополнительный слой из жесткого пенопласта. Последние три способа часто неприемлемы из-за различных ограничений, указанных выше. Поэтому, наилучших результатов можно добиться, используя ребра жесткости и ДТК, часто совместно.

### **Применение ребер жесткости и дополнительных точек крепления**

Проектирование ЧО рекомендуется начинать с определения собственных форм колебаний (СФК) ячейки ЭА. Находить СФК прямоугольных конструкций с простейшими моделями креплений целесообразно аналитическими методами, так как они обеспечивают наибольшее быстродействие вычислений, а сложных конструкций – с помощью систем конечно-элементного анализа или специально разработанных препостпроцессорных сред на их основе.

С этой целью нами разработана программа VibroDefence [5], которая имеет в своем составе пре- и постпроцессор, использующие мощную систему конечно-элементного анализа ANSYS в качестве вычислителя. Это не требует от разработчика ЭА изучения встроенного интерфейса и, в тоже время, позволяет анализировать СФК ячеек любой сложности и выбирать те формы, которые конструктивно обеспечивают требуемую частоту, а так же оптимизировать массогабаритные показатели.

Метод ЧО с помощью ребер жесткости и ДТК заключается в модификации ячейки таким образом, чтобы СФК исходной конструкции, часто-

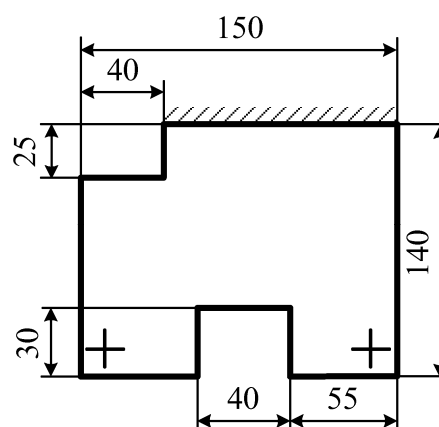
та которой выше максимальной частоты вибрации, примерно равнялась первой для модифицируемой конструкции.

Расположение ребер жесткости и ДТК определяются из анализа СФК ячеек. Первоначально рассматриваются те СФК, обеспечение которых не требует изменения крепления и может быть осуществлено только установкой ребер жесткости в местах образования узловых линий [4]. При этом ребра должны проходить через места крепления ячейки. Если СЧК таких конструкций ниже требуемых значений, то применяются ДТК для обеспечения остальных СФК. Сочетание ДТК и ребер жесткости позволяет создать конструкции практически с любыми первыми СФК.

В качестве примера на рис. 1 представлена ячейка ЭА сложной конструкции из стеклотекстолита СТЕФ (ГОСТ 12652-74) толщиной 1,5 мм, а в таблице – возможные конструктивные решения для ее ЧО, полученные с использованием программы VibroDefence.

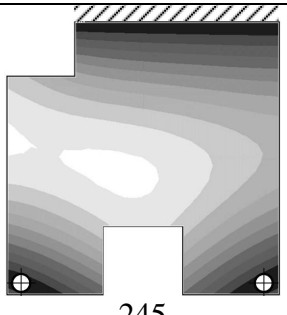
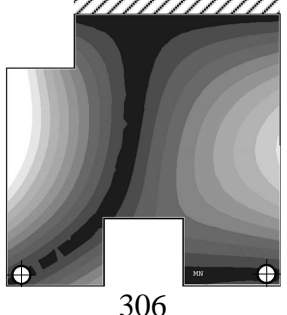
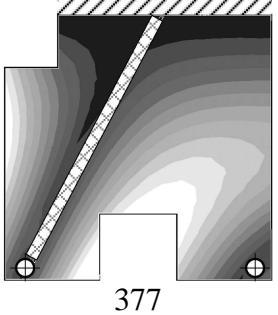
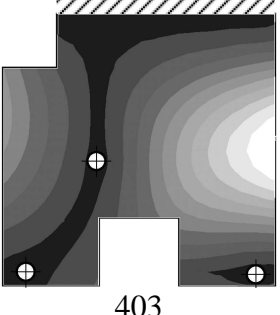
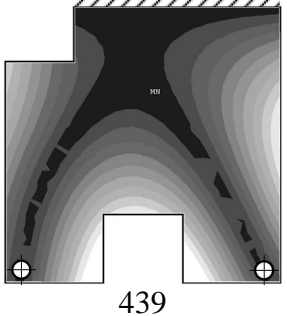
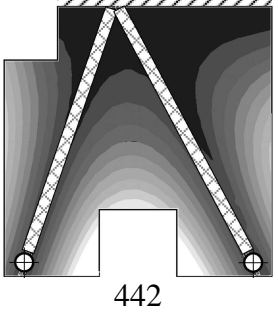
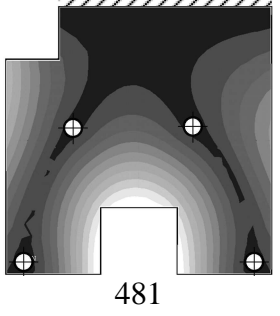
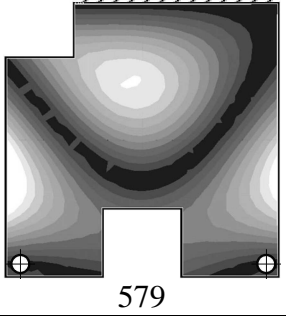
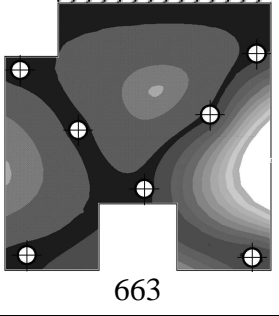
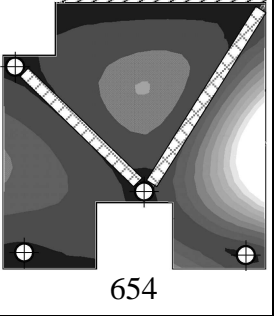
В столбце 2 приведены первые 4 СФК исходной конструкции ячейки (черным цветом изображены минимумы амплитуд колебаний, белым – максимумы), в столбцах 3-5 – варианты конструкций, включающие ребра и ДТК, и соответствующие им СЧК.

В таблице под точкой крепления подразумевается крепление винтом В.М2.5-6gx10.32ЛС59-1.133 ГОСТ 17476-80 массой 0.8г – 1 шт с шайбой изоляционной А2.5. 04. 013 – ГОСТ 11371-78 массой 0.1 г – 2шт и стойкой крепежной массой 9 г – 1 шт. Каждая ДТК уменьшает полезную площадь ячеек на  $59 \text{ мм}^2$ . Считалось, что ребра жесткости сечением  $3 \times 10 \text{ мм}$  выполнены из материала платы. Для наглядности полученных результатов ЭРЭ на плату не устанавливались.



**Рис. 1. Конструкция ячейки:**  
// – жесткое защемление;  
— – свободный край;  
+ – точка крепления.

## Собственные формы и частоты колебаний

№ СФК	Формы колебаний и СЧК, Гц	СФК и СЧК только при установке ребер жесткости, Гц	СФК и СЧК только при установке ДТК, Гц	СФК и СЧК при установке ребер жесткости и ДТК, Гц
1	2	3	4	5
1	 245	—	—	—
2	 306	 377	 403	—
3	 439	 442	 481	—
4	 579	— не применимы, так как ребра не будут проходить через места крепления	 663	 654

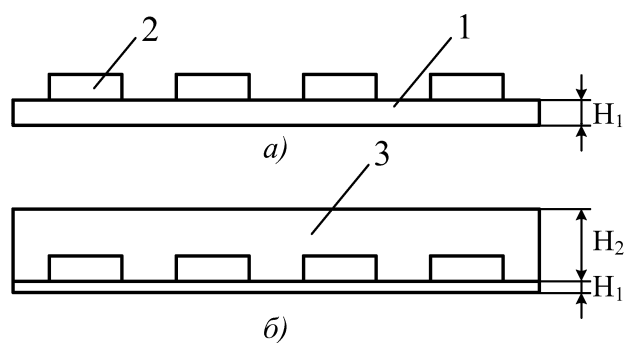
Так как СЧК должна превышать верхнюю границу частоты возбуждения, выбор той или иной СФК для проектирования ЧО определяется диапазоном воздействующей вибрации. Например, для виброзащиты ячейки ЭА, используемой на железнодорожном транспорте (частоты возбужде-

ния до 300 Гц по ГОСТ РВ 20.39.304-98) необходимо выбрать СФК не ниже второй (306 Гц), в составе высокоскоростных транспортных средств на гусеничном ходу (частоты до 500 Гц) – не ниже четвертой (579 Гц) и т.д...

В столбце 3 показаны варианты конструкции только с ребрами жесткости, в 4 – только с ДТК, в 5 – с ребрами и ДТК совместно. Для каждой из них должно выполняться условие отсутствия резонансов:  $f_1 > 1,3 \cdot f_b$ . В данном случае при эксплуатации до 300 Гц только вариант с ДТК (403 Гц) удовлетворяет этому условию. Для виброзащиты ячейки только ребрами жесткости необходимо обеспечивать следующую СФК, третью, на частоте 439 Гц; при эксплуатации до 500 Гц подходят обе предложенных конструкции, так как их частоты (663 Гц и 654 Гц) превышают  $1,3 \cdot 500 \text{ Гц} = 650 \text{ Гц}$ . Окончательный выбор определяется разработчиком с учетом возможных массогабаритных показателей, конструкций блока ЭА и других факторов.

### Применение слоев жесткости

Повысить СЧК возможно также применением слоев из жесткого пенопласта, но это может привести к существенному увеличению массы конструкции (рис. 2) [3]. Этот недостаток можно устранить, если применить для электромонтажной платы стеклотекстолит меньшей толщины. Например, вместо толщины 1,5 мм применить стеклотекстолит 0,5 мм. Так как



**Рис. 2. Пример нанесения слоя из жесткого пенопласта:**

а – до нанесения; б – после нанесения;  
1 – плата; 2 – ЭРЭ; 3 – слой пенопласта.

плотность жестких пенопластов в десять или более раз меньше плотности стеклотекстолита, нанесение слоя из такого материала толщиной 10 мм или даже больше не приведет к существенному увеличению массы конструкции, а жесткость ее и, следовательно, СЧК возрастут.

Максимально допустимую толщину слоя, наносимого по всей поверхности ячейки, можно найти из выражения [3]:

$$H_2 = \frac{N\rho_1(h_{1н} - h_{1к})}{\rho_2}, \quad (1)$$

где  $N$  – допустимый коэффициент увеличения начальной массы конструкции,  $h_{1н}$  и  $h_{1к}$  – начальная и конечная толщина электромонтажной платы соответственно,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности материала платы и слоя соответственно.

Если слой пенопласта наносится заливкой поверх ЭРЭ, то его толщина должна быть увеличена пропорционально уменьшению объема, занимаемого ЭРЭ.

### Целевая функция

Основной задачей при ЧО является обеспечение условия:

$$f_1 > 1,3 \cdot f_v, \quad (2)$$

где  $f_1$  – первая СЧК ячейки,  $f_v$  – верхняя граница диапазона воздействующей вибрации.

При этом необходимо, чтобы увеличение массы конструкции ячейки было минимальным. Поэтому, в качестве целевой функции целесообразно выбрать минимум массы при обеспечении основного условия эффективности ЧО в виде (2). Также нужно учитывать, что и минимальная масса не должна превышать величину, которая может быть указана в ТЗ на устройство. Исходя из этого, наряду с параметром оптимизации масса конструкции ячеек ЭА должна входить и как ограничение:  $m \leq m_{\text{доп}}$ . В массу ячейки ЭА ( $m$ ) входит суммарная масса ребер жесткости, которая зависит от количества ребер  $n$ , их плотности  $\rho_r$ , высоты  $H_r$ , длины  $l$ , и ширины  $s_r$ . Также массу конструкции увеличивают точки крепления  $m_{\text{дтк}}$ , массогабаритные параметры электромонтажной платы ( $S$ ,  $H_{\text{п}}$ ,  $\rho$ ) и слоя из пенопласта ( $H_{\text{с}}$ ,  $\rho_{\text{с}}$ ).

Габаритные размеры ячейки: максимальная длина, ширина определяются, исходя из конструкции блоков, требований схемы электрической принципиальной, и не изменяются в процессе применения ЧО, а общая высота ячейки может существенно повысится и превысить допустимое значение из-за применения ребер жесткости или слоя пенопласта. Поэтому, она тоже должна быть ограничена и не превышать величину  $H_{\text{доп}}$ , определяемую конструкцией блоков ЭА.

В общем виде, целевая функция имеет вид:

$$m \rightarrow \min(S, H_n, \rho, m_{\text{дтк}}, n, \rho_p, H_p, l_1 \dots l_n, s_p, H_c, \rho_c),$$

при условии, что:  $f_1 \geq 1,3 \cdot f_B$ ;  $m \leq m_{\text{доп}}$ ;  $H \leq H_{\text{доп}}$ .

Количество, длина ребер жесткости и число ДТК определяются, исходя из конструкции ячейки ЭА. Затем в зависимости от выбранного способа ЧО оптимизируются высота ребер или площадь ячейки, или высота платы, или толщина слоя. Ширина ребер жесткости варьируется в диапазоне от 1,5 до 3 мм, так как ребро больше 3 мм приводит к существенному увеличению массы, а при значениях ниже 1,5 мм могут возникнуть резонансные колебания самих ребер вследствие недостаточной их жесткости. Высота ребер жесткости должна быть достаточна для образования узловых линий вдоль ребер. Дальнейшее увеличение высоты ребер не повышает существенно СЧК конструкции, но значительно увеличивает ее массу [4]. Обычно ребра жесткости высотой меньше 5 мм не приводят к повышению СЧК плат толщиной 1-1,5 мм.

Поиск оптимального значения перечисленных факторов может быть произведен простым приращением величины или любым методом одномерной оптимизации после определения максимальных и минимальных значений: дихотомического деления, золотого сечения, чисел Фибоначчи, полиномиальной аппроксимации и т.д...

### **Алгоритм оптимизации**



Блок-схема алгоритма оптимизации виброзащиты ячеек ЭА методом частотной отстройки показана на рис. 3. Она может быть встроена в общий алгоритм проектирования виброзащиты, опубликованный в работе [1], вместо соответствующего этапа или применяться автономно.

В работе [4] описан алгоритм оптимизации ЧО только простейших конструкций, что позволяло представлять соответствующую блок-схему в виде линейного последовательного применения рассмотренных выше способов ЧО. Алгоритм на рис. 3 предназначен для проектирования ЧО практически любых ячеек ЭА и представляет собой оптимизационную функцию, полученную декомпозицией цикла увеличения жесткости конструкции [1]. В нем выполняются структурный синтез конструкции на основе пяти основных способов ЧО с последующей параметрической оптимизацией выбранного варианта с целью поиска минимальной массы конструкции при обеспечении основного условия (2).

Первые два этапа – установка ребер жесткости и изменение крепления ячейки представляют собой вложенные циклы и производятся по представленному выше методу, основанном на анализе и обеспечении СФК ячейки. Операции определения СЧК в алгоритме условно не показаны. Эти характеристики находятся при обращении к ним в блоках проверки условия (2).

Исходными данными (блок 1) для проектирования ЧО являются размеры ячейки ЭА, способ ее крепления и частотный диапазон воздействующих вибраций. В блоке 2 определяются несколько СФК конструкции, частота которых превышает верхнюю границу диапазона воздействующих вибраций. Далее (блоки 3-5, 9-11, 13) производится анализ СФК с целью их возможного обеспечения с помощью ребер жесткости, ДТК или совместным использованием этих способов.

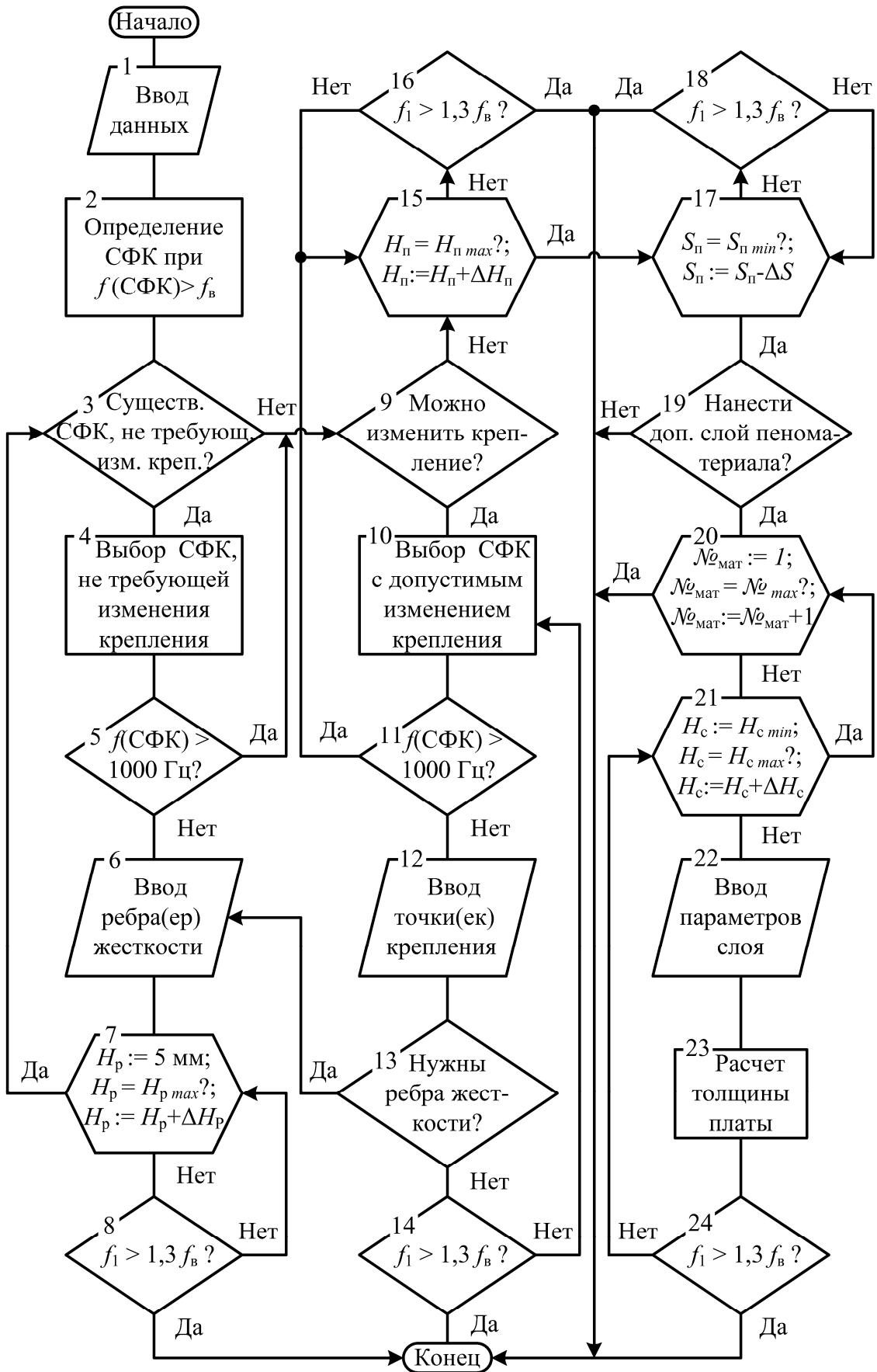


Рис. 3. Алгоритм оптимизации частотной отстройки

Выбор СФК зависит от конкретного решения, но рекомендуется первоначально рассматривать те СФК, обеспечить которые возможно только ребрами жесткости без установки ДТК (блок 4). Располагать ребра жесткости необходимо в местах образования узловых линий (блок 6).

Затем производится поиск оптимальной высоты установленных ребер жесткости от 5 мм до максимально допустимого значения. В алгоритме это изображено в виде циклического перебора вариантов конструкции (блок 7). На каждой итерации выполняется приращение высоты ребра на определенную величину (2-5 мм) и проверяется, не превышает ли СЧК ячейки верхнюю границу вибрации на 30% (блок 8). Если да (резонансные колебания устранены), работа алгоритма заканчивается. В противном случае необходимо вернуться к анализу других СФК (блоки 3 и 4) с другими вариантами расположения ребер жесткости. Обычно высшие СФК требуют более сложных вариантов установки ребер.

Если не удастся обеспечить ни одной СФК в диапазоне от  $f_B$  до 1000 Гц (блоки 5 и 11) только установкой ребер жесткости, то при возможном изменении крепления конструкции (блок 9) рассматривается обеспечение прочих СФК (блок 10) с помощью одних ДТК, размещаемых также по узловым линиям (блок 12), или одновременно ребрами и ДТК (блок 13).

Если и эти меры не приводят к повышению СЧК, то рассматриваются варианты увеличения толщины (блоки 15-16) и уменьшения площади ячейки (блоки 17-18), представленные в виде соответствующих этапов параметрической оптимизации.

Заключительной мерой (блоки 19-24) может быть нанесение слоя из пенопласта. В этом случае (блок 19) выбирается материал слоя из базы данных (блок 20), определяется его высота (блок 21-22) и рассчитывается толщины электромонтажной платы (блок 23) по формуле (1).

### **Заключение**

Представленный алгоритм и разработанная на его основе программа, входящая в состав программного комплекса [5], позволяет разработчику быстро и эффективно применять способы частотной отстройки ячеек электронной аппаратуры, что значительно сокращает время разработки новых изделий и уменьшает объем их экспериментальной отработки.

### Список литературы

1. **Талицкий Е.Н.** Алгоритм проектирования виброзащиты электронной аппаратуры // Информационные технологии. – М., 2009. – №1. (в печати)
2. **Ухин В.А., Талицкий Е.Н.** Определение собственных частот колебаний ячеек радиотехнических устройств со сложным способом закрепления // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы VI международной научно-технической конференции, Владимир, 2005. – с. 156-158.
3. **Талицкий Е.Н.** Оценка эффективности антирезонансных покрытий субблоков микроселектронной аппаратуры // НТС «Техника средств связи», М., 1982, вып. 1. С. 43-52.
4. **Ухин В.А., Талицкий Е.Н.** Алгоритм проектирования виброзащиты электронной аппаратуры методом частотной отстройки // Всероссийский научно-технический журнал «Проектирование и технология электронных средств», Владимир, 2006. №3. С. 61-64.
5. **Талицкий Е.Н., Шумарин С.В.** Программный комплекс проектирования виброзащиты ячеек электронной аппаратуры // Международный научно-технический журнал «Программные продукты и системы». Тверь. 2008. №3. С. 103-104.