

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЯМЫХ УЧАСТКОВ ВОЛНОВОДОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

Гоцелюк О.Б.

научный руководитель канд. техн. наук Кудрявцев И.В.

*Сибирский федеральный университет*

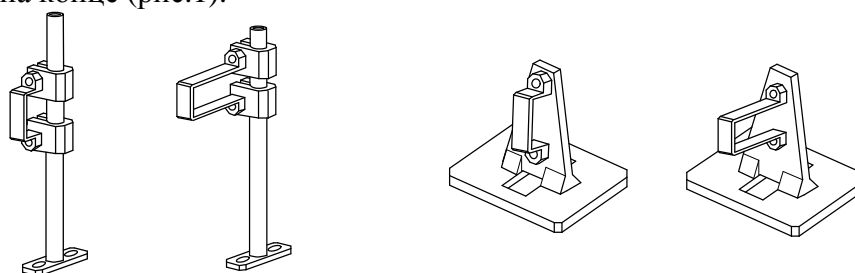
Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-257.2013.8

Конструкция волноводно-распределительных систем (ВРС) космических аппаратов (КА) связи состоит из отдельных участков волноводов в виде последовательного соединения отдельных прямых и криволинейных тонкостенных элементов прямоугольного поперечного сечения через муфты или фланцы.

В зависимости от назначения, участки волноводов могут иметь различную конфигурацию, поперечные размеры, протяженность и способы закрепления.

В процессе изготовления, испытаний, вывода в космос и эксплуатации на орбите в течение заданного срока активного существования (САС), волноводы подвергаются воздействию различных нагрузок: статических, динамических, температурных и др. При этом к конструкции волноводов предъявляются жесткие требования по прочности и жесткости.

Обеспечить заданные условия прочности и жесткости протяженных конструкций волноводов возможно с помощью установки промежуточных опор. Типовая конструкция промежуточных опор состоит из стойки и хомутового соединения на конце (рис.1).



а – стержневая опора;

б – пластинчатая опора

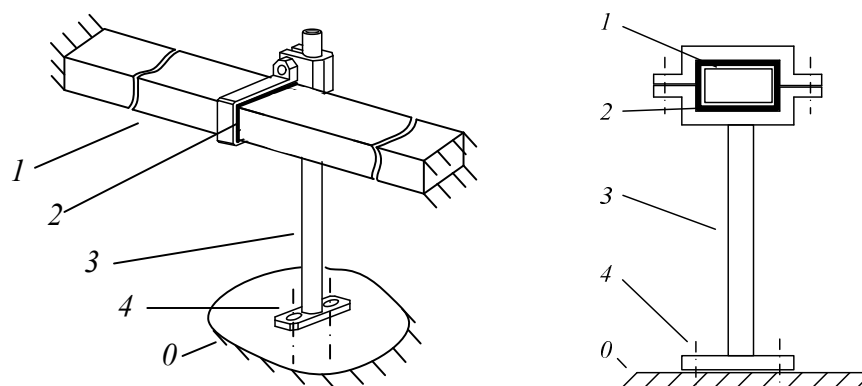
Рисунок 1 – Варианты конструктивного исполнения опор для крепления участков ВРС

Рассмотрим прямолинейный участок волновода с промежуточной стержневой опорой в центре. Края волноводного участка, как правило, соединяются с массивными блоками приемно-передающей аппаратуры, жесткость которых весьма велика. Поэтому в качестве условий закрепления в этих точках корректно применять жесткую заделку (рис.2,а).

Между корпусом волновода и крепежным хомутом располагается электроизоляционная прокладка (рис.2) из ленты типа ЛЭТСАР, изготовленная на базе полимеров силоксановых. Материал данной прокладки имеет очень высокую аутогезию (самослипание) и самоусадку, это приводит к тому, что через некоторое время после установки она образует герметичное и прочное соединение не только между своими витками, но и с соединяемыми элементами.

Стержневая опора представляет собой тонкостенную трубку, которая имеет конечную изгибную жесткость. С учетом наличия между волноводом и соединяемым хомутом эластичного материала ЛЭТСАР (рис.2) малой жесткости это приводит к

тому, что стержневая опора позволяет малые угловые смещения участка. Следовательно, моделью стержневой опоры можно считать шарнирное соединение с некоторой угловой жесткостью. В качестве первого приближения, данной угловой жесткостью мы будем пренебрегать.



1 – волновод; 2 – изоляционная прокладка; 3 – стойка опоры;  
4 – болтовое соединение стойки с основанием; 0 – основание.

Рисунок 2 – Конструкция участка ВРС с промежуточной опорой

Выполним анализ устойчивости прямолинейных участков волноводов и сформулируем требования к характеристикам промежуточных опор для обеспечения наибольшей эффективности их работы.

Будем считать, что потеря устойчивости изготовленного и смонтированного на КА участка ВРС может произойти только при воздействии на него эксплуатационных нагрузок. В процессе вывода на орбиту и эксплуатации КА на волноводы будут действовать следующие нагрузки:

- 1) ускорение порядка  $a=20g$  в процессе вывода на орбиту;
- 2) ударные нагрузки амплитудой до  $a=2500g$  при отделении отработавших ступеней ракеты-носителя;
- 3) нагрев от солнечного излучения (до  $+120^{\circ}C$ ) и при передаче сигналов большой мощности при эксплуатации КА на заданной орбите в течении всего срока активного существования.

Все указанные выше нагрузки будут действовать в различные моменты времени, поэтому рассмотрим их влияние на устойчивость участков волновода по отдельности.

Рассмотрим участок прямолинейного волновода, протяженность которого много больше поперечного сечения, подкрепленного стержневыми опорами. Тогда для такой конструкции волновода будет справедлива стержневая модель и для оценки его устойчивости можно воспользоваться известным уравнением Л.Эйлера, которое получено для случая действия сосредоточенной сжимающей силы:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{\mu^2 l^2}, \quad (1)$$

- где  $E$  – модуль Юнга материала волновода;  
 $J$  – наименьший осевой момент инерции поперечного сечения волновода;  
 $\mu$  – коэффициент, определяющий способ закрепления участка волновода;  
 $l$  – длина рассматриваемого участка волновода.

При действии ускорения и ударных нагрузок на участок волновода действует инерционная нагрузка, силовым эквивалентом которой будет являться распределенная по его длине распределенная сила  $q$ :

$$q = \frac{a \cdot m}{l} = \frac{a \cdot V \cdot \rho}{l} = a \cdot S \cdot \rho, \quad (2)$$

где  $a$  – действующее ускорение;  $m$  – масса участка волновода;  
 $V$  – объем материала участка волновода;  $\rho$  – плотность материала волновода;  
 $S$  – площадь поперечного сечения участка волновода.

Из теории устойчивости (Вольмир А.С. «Устойчивость деформируемых систем») известно выражение для критической распределенной нагрузки  $q_{кр}$ :

$$q_{кр} = 7,84 \frac{EJ}{l^3} \quad (3)$$

Объединяя выражения (2) и (3), получим выражение для критического значения ускорения при условии жесткой заделки участка волновода:

$$a_{кр} = \frac{7,84 \cdot EJ}{S \cdot \rho \cdot l^3}. \quad (4)$$

Принимая типоразмер волновода - 35x15, материал волновода - АД31 и длины 0,25 и 0,5 м, были получены значения критического ускорения 692 456g и 86 557g соответственно. Данные результаты показывают, что даже в случае протяженного участка волновода (0,5м) критическое ускорение составляет 86 557g, что во много раз превосходит возникающие нагрузки (2 500g). Следовательно, потери устойчивости для рассматриваемых участков волноводов от действия инерционных нагрузок при выводе КА на орбиту не произойдет.

В третьем случае нагружения необходимо учесть нагрев волновода. При нагреве волновода его материал будет расширяться и при наличии закреплений появится продольная сжимающая сила, которая определяется как:

$$N = \sigma \cdot S, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – нормальные напряжения при растяжении-сжатии материала;  
 $S$  – площадь поперечного сечения волновода.

Учитывая закон Гука

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (6)$$

а также зависимость тепловых деформаций от температуры

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T, \quad (7)$$

получим зависимость продольной силы от температуры в следующем виде:

$$N_{T,^{\circ}C} = \alpha \cdot \Delta T \cdot ES. \quad (8)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения материала;

$\Delta T$  – изменение температуры волновода от начального значения.

С учетом выражений (1) и (8), получим формулу, определяющую критическое значение температуры:

$$\Delta T_{кр} = \frac{EJ \cdot \frac{\pi^2}{\mu^2 l^2}}{\alpha \cdot ES} = \frac{J \cdot \pi^2}{\alpha \cdot S \cdot \mu^2 l^2}. \quad (6)$$

Подставляя значения для рассматриваемых участков волноводов, получим, что при шарнирном закреплении критические значения температур составят:

1) для шарнирного закрепления

– для участка длиной 0,25м:  $\Delta T_{кр} = 66,3^{\circ}C$ ;

– для участка длиной 0,5м:  $\Delta T_{кр} = 16,6^{\circ}C$ ;

2) для закрепления в виде жесткой заделки

– для участка длиной 0,25м:  $\Delta T_{кр} = 256,2^{\circ}C$ ;

– для участка длиной 0,5м:  $\Delta T_{кр} = 66,3^{\circ}\text{C}$ .

Полученные результаты показывают опасность температурного нагрева для протяженных участков волноводов, особенно при их шарнирном опирании. Конструкция стержневой опоры обладает некоторой изгибной жесткостью, значение которой зависит от вида опоры и высоты закрепления на ней участка волновода.

Увеличить изгибную жесткость стержневой опоры можно путем изменения ее конструкции, например, использованием в качестве стойки не прямолинейный стержень, а конус. Однако такой подход существенно снизит технологичность ее конструкции и увеличит массу.

Более рациональным будет другой подход: позволить закрепляемому участку волновода перемещаться через промежуточные опоры вдоль своей продольной оси при температурном расширении. В этом случае возникающая продольная сила будет передаваться не на промежуточные опоры, а на присоединенные по краям участка волновода неподвижные блоки приемо-передающей аппаратуры, что может привести к появлению в локальных местах его закрепления концентрации напряжений.

Одним из способов, применяемый в настоящее время для эффективной компенсации теплового расширения волноводов является включение в состав их конструкции гибких секций – прямолинейных тонкостенных участков волновода в форме сильфона, имеющим относительно низкую линейную и угловые жесткости. В этом случае прямолинейный участок волновода сможет свободно перемещаться вдоль своей оси через промежуточные опоры, а продольные тепловые деформации будут полностью восприниматься гибкой секцией. Наличие подвижности волновода допускает в его осевом направлении появления продольных колебаний. Однако жесткость, а следовательно и частота продольных колебаний во много раз больше чем для изгибных колебаний и не так опасна. Поперечные перемещения участка волновода будут эффективно восприниматься промежуточными опорами, имеющими в осевом направлении большую жесткость.

Наличие между волноводом и хомутовым соединением промежуточной опоры прокладки из эластичного материала помимо электроизоляции, придает соединению демпфирующие свойства, снижающие амплитуды колебаний участка при переменных внешних нагрузках. Эффективно снижать амплитуду вынужденных колебаний участка можно при условии, что коэффициент демпфирования прокладки будет выше некоторого критического значения, которое можно теоретически определить как:

$$c_{кр} \geq 2 \cdot m \cdot \omega, \quad (7)$$

где  $m$  - масса участка волновода на одну опору;

$\omega$  - демпфируемая круговая частота колебаний.

Таким образом, упругие свойства прокладки должны позволять закрепленному участку волновода деформироваться (перемещаться) вдоль своей продольной оси и демпфировать поперечные перемещения при вынужденных колебаниях.

Применяемая в настоящее время прокладка в виде эластичного материала ЛЭТСАР за счет аутогезии неподвижно соединяет контактирующие с ней поверхности волновода и опоры. Поэтому продольные смещения волновода через промежуточные опоры происходят в основном за счет деформации слоя данной эластичной прокладки.

### **Заключение**

В данной работе было рассмотрено влияние рабочих воздействий (ускорения и температуры) на устойчивость волноводов. Результаты показали, что наиболее опасными являются температурные воздействия, в связи с чем были сформулированы требования к промежуточным опорам, позволяющие компенсировать возникающие тепловые эффекты.