

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ
СОСТОЯНИЕ ПРЯМЫХ УЧАСТКОВ ВОЛНОВОДОВ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ**

Овсянников С.В.

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

ОАО «Информационные спутниковые системы»

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-257.2013.8

Волноводно-распределительные системы (ВРС) крупногабаритных антенно-фидерных устройств космических аппаратов предназначены для передачи сигналов между приемо-передающими антеннами и аппаратными компонентами системы связи.

Конструктивно, волноводно-распределительные системы представляют собой набор отдельных участков волноводов в виде последовательного соединения при помощи пайки отдельных прямых и криволинейных тонкостенных элементов прямоугольного поперечного сечения через соединительные муфты или фланцы.

В процессе изготовления, испытаний, вывода в космос и эксплуатации на орбите в течение заданного срока активного существования (САС), волноводы подвергаются воздействию различных статических и динамических нагрузок: силовых, деформационных, температурных и др. В связи с этим, к конструкциям волноводов и ВРС в целом предъявляются соответствующие требования по прочности и жесткости.

Одним из важнейших условий, предъявляемых к конструкциям волноводов, является обеспечение их жесткости, которая контролируется их частотой собственных колебаний, минимальное значение которой не должно быть меньше некоторого заданного допустимого значения:

$$f_{\min} \geq [f]. \quad (1)$$

Допустимое значение частоты собственных колебаний задается техническими условиями и определяется на основе спектра частот вынужденных колебаний космического аппарата в целом, которые происходят в результате воздействия вибрации от двигателей ракеты-носителя спутника при их работе.

Существующие методы расчета статического, динамического и термоупругого состояния волноводов проводятся независимо друг от друга, что не соответствует действительным условиям их работы. В частности, оценку жесткости конструкций волноводов проводят без учета сопутствующих факторов, например, температуры их материала. Изменение температуры материала любой конструкции влечет за собой соответствующее изменение геометрии вследствие температурного расширения при нагреве, либо сжатия при охлаждении. Такие изменения для несвободных элементов конструкции приводит к появлению в них внутренних температурных напряжений, которые изменяют их расчетное статическое и динамическое состояние непосредственно, либо косвенно.

В настоящей работе проведено исследование влияния температуры прямолинейного участка волновода на его динамическое состояние, определяемого первой частотой собственных колебаний. Будем рассматривать такие изменения температуры, которые могут встречаться при выводе в космос и эксплуатации космического аппарата на орбите. Источником нагрева при выводе на орбиту являются перепады температуры в околоземном пространстве, а на орбите – солнечные лучи и выделение тепла в результате потерь мощности передаваемых по волноводу сигналов.

Охлаждение волновода происходит в тени, вплоть до величины температуры космического холода.

Расчетной схемой для протяженного прямолинейного участка волновода в первом приближении можно считать шарнирно опертый стержень с эквивалентными геометрическими характеристиками, условиями закрепления и нагружения (рис.1).

При облучении солнечными лучами теневая сторона волновода должна иметь меньшую температуру, однако в вакууме она будет фактически теплоизолированная. В этом случае температурное поле волновода можно считать равномерным и однородным. Если же нагрев волновода происходит в результате потерь мощности передаваемых по нему сигналов, то в этом случае также можно принять равномерный прогрев его конструкции. Следовательно, в расчете принимаем равномерный прогрев конструкции волновода по всем его направлениям.

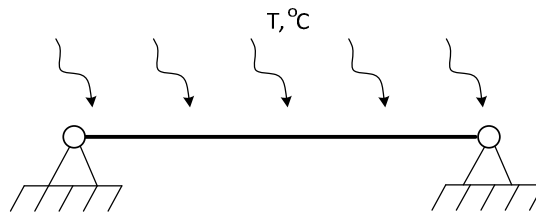


Рисунок 1 – Схема воздействия солнечных лучей на участок волновода

В результате воздействия солнечных лучей, либо потерь мощности передаваемых сигналов, участок волновода нагреется и получит температурное расширение, которое можно заменить эквивалентной продольной силой N . При нагреве волновода, продольная сила N будет сжимающей, а при охлаждении – растягивающей.

Сжатие стержня будет являться более опасным состоянием, поскольку при этом будет происходить понижение частоты собственных колебаний с последующей возможной потерей устойчивости. Поэтому для расчетной схемы примем сжимающее направление продольной силы N , как показано на рис.2. Пунктиром показано изогнутая продольная ось волновода, соответствующая его первой форме колебаний.

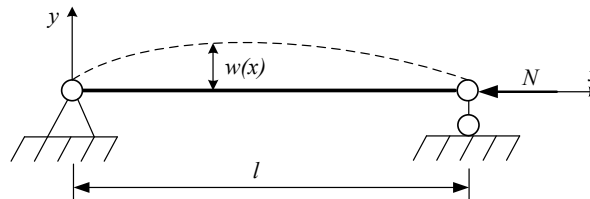


Рисунок 2 – Расчетная схема участка волновода

Выделив бесконечно малый элемент изогнутого волновода, и рассмотрев условия его равновесия, получим уравнение динамического состояния для полученной расчетной схемы, которое подобно уравнению, полученному Тимошенко С.П. в своем известном труде «Прочность и колебания элементов конструкций», 1975г.:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(N \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \rho S \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q(x, t), \quad (2)$$

где $w = w(x, t)$ – прогиб продольной оси волновода;

E – модуль Юнга материала волновода;

J – момент инерции волновода;

ρ – плотность материала волновода;

S – площадь поперечного сечения волновода;

$q(x, t)$ – внешнее силовое воздействие на волновод.

В исходном виде уравнение (2) фактически описывает вынужденные колебания волновода под действием продольной силы N и внешней поперечной динамической нагрузки $q(x,t)$. Для оценки собственных частот колебания волновода, необходимо рассмотреть уравнение свободных колебаний, для этого необходимо принять:

$$q(x,t) = 0. \quad (3)$$

Также, заметим, что геометрия стержня и свойства его материала, а также продольная сила N не изменяются вдоль длины волновода и, следовательно, не зависят от координаты x , что позволяет вынести их как константы из-под знака дифференцирования. В этом случае, уравнение свободных колебаний примет следующий вид:

$$EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \rho S \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \quad (4)$$

В качестве решения необходимо задаться такой функцией прогибов $w = w(x,t)$, которая бы удовлетворяла граничным условиям закрепления стержня. Поскольку разрешающее уравнение имеет 4-й порядок, то необходимо задать 4 граничных условия, по два на каждую из опор волновода. Для шарнирных опор характерны следующие условия работы:

$$1) \text{ отсутствие прогибов } \quad w = w(x=0,t) = 0; \quad (5)$$

$$w = w(x=l,t) = 0;$$

2) отсутствие изгибающих моментов, которые, согласно уравнению упругой линии балки, можно выразить через вторую производную от прогибов

$$\frac{\partial^2 w(x=0,t)}{\partial x^2} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 w(x=l,t)}{\partial x^2} = 0.$$

В качестве разрешающей функции воспользуемся уравнением вида:

$$w(x,t) = A \sin\left(\frac{x\pi}{l}\right) \sin(\omega t), \quad (7)$$

где A – амплитуда колебаний;

ω – угловая частота колебаний, рад/с.

Зная значение угловой частоты колебаний ω , можно легко определить и величину частоты колебаний, как

$$f = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (8)$$

Разрешающая функция (7) определяет форму колебаний в виде полупериода синуса и удовлетворяет всем граничным условиям, что можно проверить непосредственной в них подстановкой.

Подставив разрешающую функцию (7) в уравнение свободных колебаний (4) получим:

$$EJ \cdot A \sin\left(\frac{x\pi}{l}\right) \cdot \frac{\pi^4}{l^4} \sin(\omega t) + N \cdot A \sin\left(\frac{x\pi}{l}\right) \cdot \frac{\pi^2}{l^2} \sin(\omega t) - \rho S \cdot A \sin\left(\frac{x\pi}{l}\right) \cdot \sin(\omega t) \cdot \omega^2 = 0,$$

или после сокращения:

$$EJ \cdot \frac{\pi^4}{l^4} - N \cdot \frac{\pi^2}{l^2} - \rho S \cdot \omega^2 = 0, \quad (9)$$

откуда найдем частоту колебаний

$$\omega = \sqrt{\frac{EJ \cdot \frac{\pi^4}{l^4} - N \cdot \frac{\pi^2}{l^2}}{\rho S}} = \pi \sqrt{\frac{EJ \cdot \frac{\pi^2}{l^2} - N}{m \cdot l}}, \quad (10)$$

где m – масса стержня.

Полученное решение (10) определяет первую собственную частоту колебания стержня с изгибной жесткостью EJ , длиной l и массой m для шарнирной двух опорной балки, на которую действует сжимающая сила N .

Для проверки корректности полученного решения (10), примем, что продольная сила отсутствует, т.е.:

$$N=0. \quad (11)$$

Из условия (11) для (10) получаем известное выражение (см., например, Бидерман В.Л. «Теория механических колебаний», 1980г.), определяющее первую собственную частоту колебания для шарнирно опертого стержня:

$$\omega = \pi^2 \sqrt{\frac{EJ}{m \cdot l^3}}. \quad (12)$$

Решение (10) показывает, что продольная сила N будет оказывать влияние на частоту собственных колебаний стержня тогда, когда будет соизмерима с его изгибной жесткостью EJ . При этом в решении (10) возможна ситуация, когда числитель дроби под корнем обратиться в ноль, то есть

$$EJ \cdot \frac{\pi^2}{l^2} - N = 0 \quad \text{или} \quad N_{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{l^2} \quad (13)$$

Этому критическому случаю соответствует такое значение продольной силы $N_{кр}$, при котором частота колебаний прямого участка волновода станет равной нулю. Из теории устойчивости этот момент известен как условие потери устойчивости конструкции при ее исследовании динамическим методом. Действительно, полученное выражение (13) полностью совпадает с формулой Л. Эйлера (см., Вольмир А.С. «Устойчивость деформируемых систем», 1967г), которая определяет критическую силу для потери устойчивости шарнирно закрепленного стержня. При этом Л. Эйлер получил ее исходя из статического метода исследования устойчивости.

Теперь учтем нагрев волновода: для этого выразим продольную силу N через закон Гука и коэффициент температурного расширения:

$$N_{T,0C} = \sigma \cdot S = \varepsilon E \cdot S = \alpha \cdot \Delta T \cdot ES, \quad (14)$$

где σ – нормальные напряжения при растяжении-сжатии материала;

α – коэффициент температурного расширения материала;

S – площадь поперечного сечения волновода.

ΔT – изменение температуры волновода от начального значения.

С учетом выражения (14), формула (10), определяющая значение частоты собственных колебаний в зависимости от температуры примет вид:

$$\omega(\Delta T) = \pi \sqrt{\frac{EJ \cdot \frac{\pi^2}{l^2} - \alpha \cdot \Delta T \cdot ES}{m \cdot l}}. \quad (15)$$

Используя значения для волноводов типоразмером 35х15 из материала АД31 и длинами 0,25 и 0,5м, на рис.3 графически показана зависимость $\omega(\Delta T)$. Здесь значения $f_{01} = 233,4$ Гц и $f_{02} = 933,6$ Гц соответствуют первым частотам собственных колебаний для волноводов длинами 0,25 и 0,5м соответственно при условии отсутствии продольной силы N , т.е. без учета влияния изменения температуры.

Значения $T_{01}=16$ и $T_{02}=66$ °С определяют температуры, при которых частота колебаний обоих вариантов длин волноводов будет равна нулю и соответствует потере их устойчивости.

Результаты показывают, что на зависимость первой частоты собственных колебаний волновода от температуры существенно влияет его длина. Так, уменьшение длины в 2 раза позволило отодвинуть момент потери устойчивости, увеличив нижний температурный предел почти в 4 раза (с +16 до +66 °С).

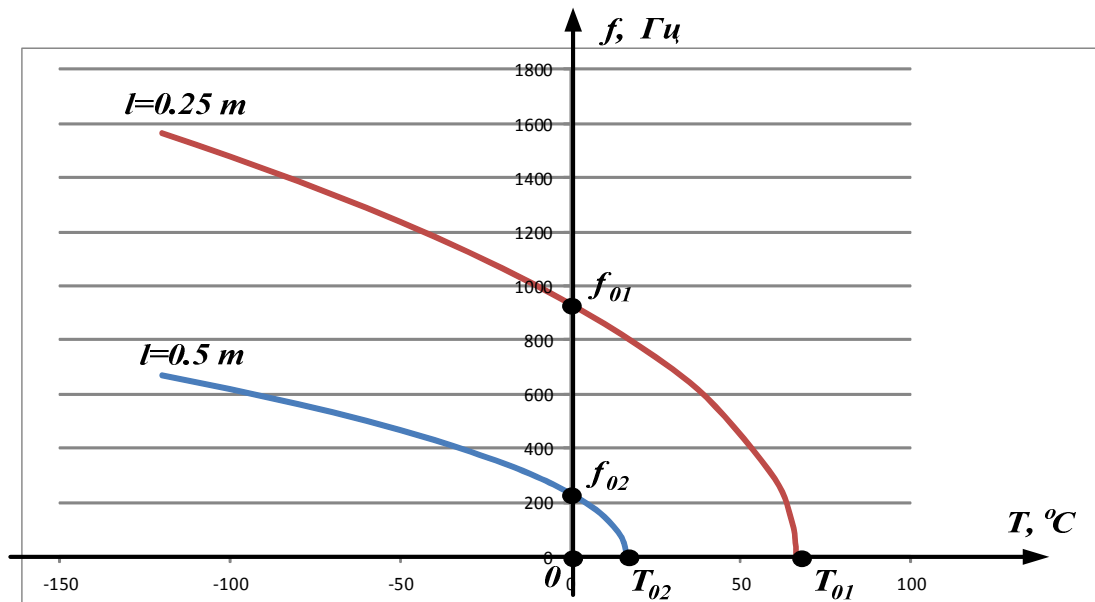


Рисунок 3 – График изменения значения первой частоты собственных колебаний волновода от температуры

Выводы

В данной работе было рассмотрено влияние температуры волновода на его динамическое состояние, которое характеризовалось первой частотой собственных колебаний. Для этого было решено уравнение упругой линии балки с учетом действия продольной силы, возникающей в результате температурных деформаций, а также инерциального члена.

Получено аналитическое решение для разрешающей функции (7) для случая шарнирного закрепления волновода, которое показало сильную зависимость частоты собственных колебаний от температуры (рис.3). В реальных условиях закрепления волновода, опоры будут иметь некоторую конечную изгибную жесткость или даже представлять собой жесткую заделку. В этих случаях мы получим значительно меньшую корреляцию частоты колебаний волновода от температуры.

При любых случаях закрепления волновода, необходимо отметить вероятность потери устойчивости их конструкции даже при относительно небольших значениях температур ($T_{01}=16$ и $T_{02}=66$ °С), что является недопустимой ситуацией. Также, расчеты, проведенные для волноводов методом конечных элементов в ППП Ansys с учетом их тонкостенной конструкции показали, что действительные частоты будут меньше на 10-15%, чем полученные здесь по теории изгиба балок.

Во избежание потери устойчивости, простым и эффективным приемом является изменение конструкции опор таким образом, чтобы они позволяли компенсировать температурные изменения размеров участка волновода.