

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ

*Н.А. Талибов, А.Н. Якимов, В.В. Смогунов
Пензенский государственный университет (г. Пенза)*

Проводится модельное исследование влияния вибрационных воздействий на линейную волноводно-щелевую антенну и её диаграмму направленности. Возникающие деформации антенны оцениваются на трехмерной модели с использованием пакета SolidWorks. Предложена математическая модель, позволяющая учесть влияние деформаций на диаграмму направленности антенны.

Микроволновые антенны, закрепленные на борту подвижных средств, например, автомобилей, самолетов или ракет, подвергаются неблагоприятному воздействию вибраций и ударов. В результате таких воздействий антенны деформируются, что приводит к отклонению относительно расчетных как их электрических характеристик, так и характеристик радиотехнической системы в целом [1, 2]. В связи с этим, возникает необходимость оценки не только расчетных характеристик проектируемых антенн, но и их изменений в результате возникающих деформаций.

Оценка результатов вибрационного воздействия представляет собой сложную задачу, строгое аналитическое решение которой в силу сложности конструкции антенны в большинстве случаев оказывается невозможным. Поэтому при решении таких задач часто прибегают к использованию приближенных методов, включая приближенное математическое описание форм колебаний антенны, полученных экспериментально [3].

Перспективным направлением в исследовании такого рода процессов в антенне является их дискретное представление, позволяющее представить векторы электромагнитного поля \mathbf{E} и \mathbf{H} , создаваемого ею, совокупностью компонент, формируемых отдельными элементами этой антенны. Зная геометрические и электрические характеристики этих элементов, можно определить центры излучающих элементов и оценить их новое пространственное положение в результате воздействия вибраций. В этом случае при построении математической модели и оценке результатов таких воздействий может быть использована классическая теория колебаний и волн в упругих телах [4, 5].

В качестве объекта исследования выберем линейную волноводно-щелевую антенну (рис. 1) длиной L с продольными щелями, смещенными относительно продольной оси на x_i .

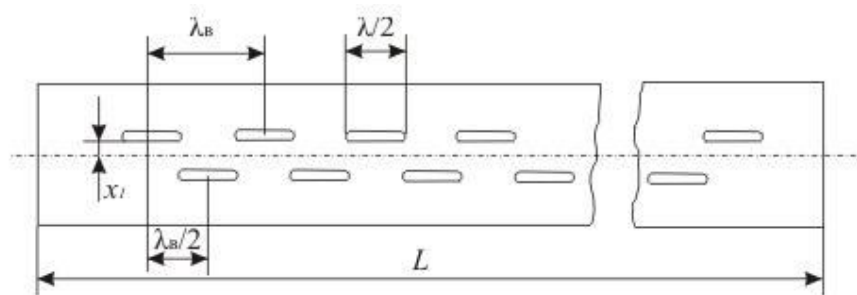


Рис.1. Линейная волноводно-щелевая антенна

Предположим, что источник механических гармонических колебаний соединен с краем антенны, а ее центральная часть жестко закреплена. При этом будем учитывать только поперечные колебания, полагая, что продольные колебания отсутствуют.

Исследуем такую антенну с использованием пакета SolidWorks 2009, где геометрическая модель антенны строится в основном пакете (рис. 2), а исследование проводится в приложении Simulink.

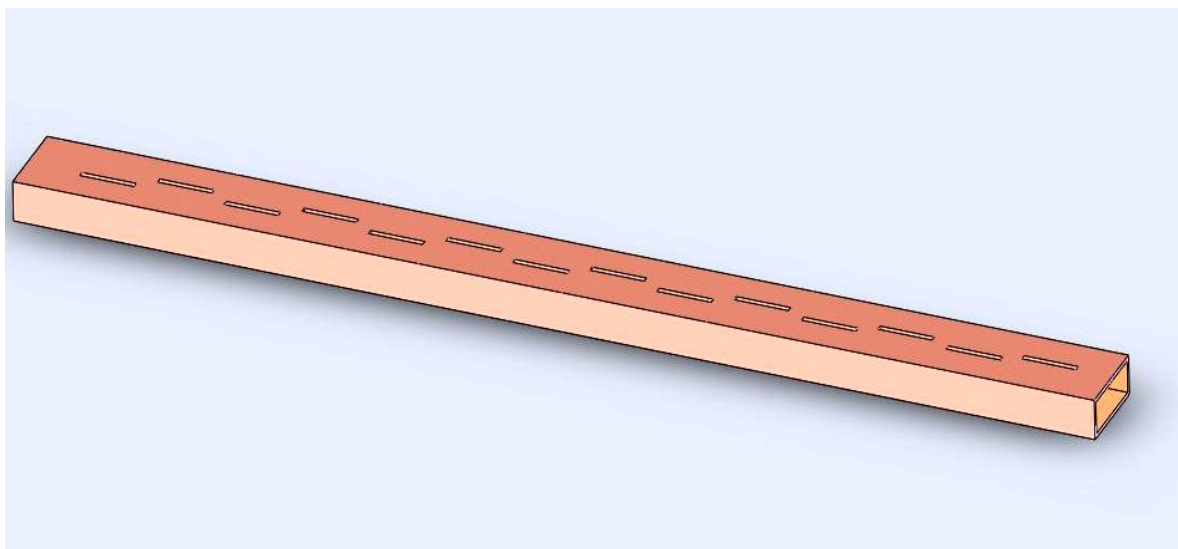


Рис. 2. Фрагмент линейной волноводно-щелевой антенны в пакете SolidWorks

При построении трехмерной модели линейной волноводно-щелевой антенны в программном пакете SolidWorks использовались следующие геометрические параметры антенны: толщина стенок, длина излучателей и их пространственное положение. В процессе построения модели учитывалось, что антенна является полый внутри, а на излучающей поверхности присутствуют сквозные щели.

К рассмотренной антенне с синфазным и равноамплитудным возбуждением (см. рис. 2) приложено следующее механическое воздействие: гармоническое колебание вида $F = F_m \cos \omega t$, где F_m – амплитуда гармонического воздействия; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; f – линейная частота; t — текущее время. Пусть амплитуда гармонического механического воздействия $F_m = 5$ Н, а его частота $f = 350$ Гц.

Исследования воздействия вибраций на линейную волноводно-щелевую антенну проводились с помощью приложения Simulink конструкторского программного пакета SolidWorks, которое позволяет приложить к плоскости детали заданные механические воздействия, предварительно выбрав в качестве материала, например, латунь, жестко закрепив её в центральной части и задав координатную сетку.

В результате приложения указанных воздействий к антенной решетке, закрепленной в центральной части, возникают деформации, при этом пространственное положение щелей на фрагменте, равном половине антенны, изменится в соответствии с рис. 3.

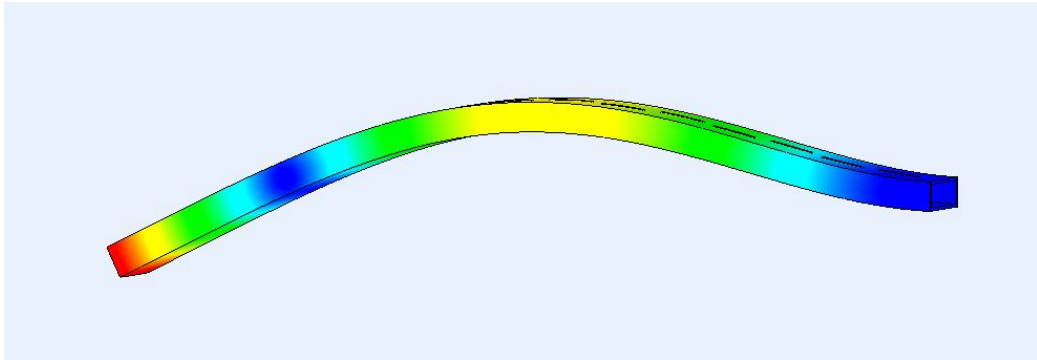


Рис. 3. Фрагмент антенной решетки под влиянием вибрации в пакете SolidWorks

Проведенные исследования позволили сравнить данные, полученные для антенной решетки представленной таким же по величине сплошным бруском и полый конструкцией волновода. Результаты исследований, проведенных в Simulink пакета SolidWorks, при указанных выше воздействиях показали, что конструкция сплошного бруска деформируется значительно меньше (рис. 4) чем конструкция волновода антенной

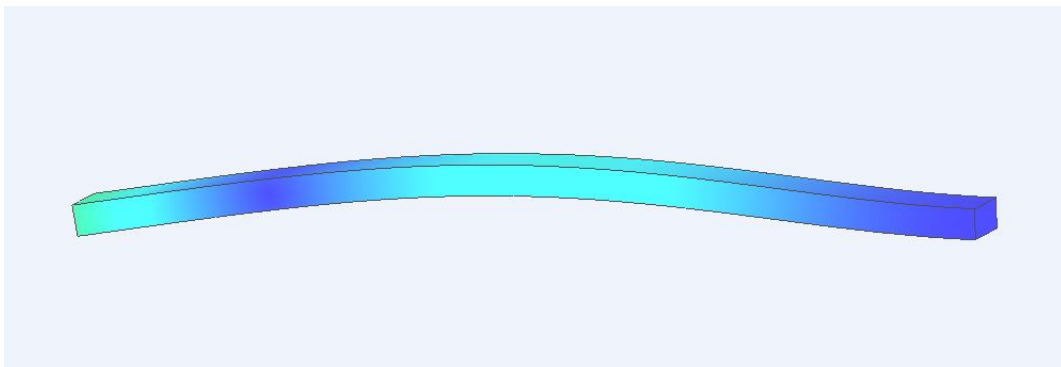


Рис. 4. Сплошной брусок под влиянием вибрации в пакете SolidWorks

решетки (см. рис. 3), что объясняется повышенной жесткостью конструкции.

Отличие деформаций, полученных для конструкции волновода антенной решетки (без щелей) и конструкции антенной решетки (с щелями), незначительно (рис. 5) и сравнимо с погрешностью изготовления антенны.

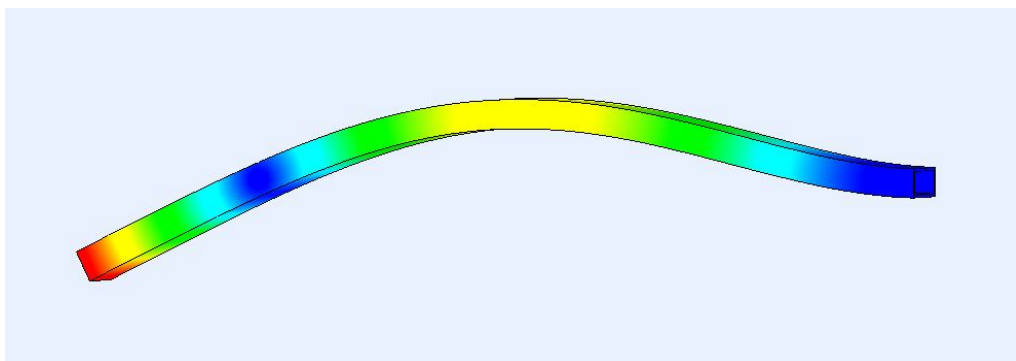


Рис. 5. Полая структура под влиянием вибрации в пакете SolidWorks

Определим влияние вибрации на диаграмму направленности волноводно-щелевой антенны при следующих условиях: длина антенны $L = 60 \tilde{\text{н}}\text{м}$; возбуждение антенны синфазное и равноамплитудное; длина электромагнитной волны $\lambda = 3 \tilde{\text{н}}\text{м}$; точка наблюдения P удалена на расстояние $R = 1000 \tilde{\text{м}}$. В качестве материала для изготовления волноводно-щелевых антенн выберем латунь, плотность которой $\rho = 8500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а модуль сдвига $G = 36 \tilde{\text{А}}\text{д}$. Пусть на антенну воздействует механическое гармоническое колебание вида $F = F_m \cos \omega t$ с амплитудой $F_m = 5 \text{ Н}$ и частотой $f = 150 \tilde{\text{А}}\text{б}$. Будем учитывать только поперечные колебания, полагая, что продольные колебания отсутствуют [4,5].

В результате приложения указанных воздействий в антенной решетке, закрепленной в центральной части, возникают деформации. При этом пространственное положение щелей антенны может быть проиллюстрировано с помощью *рис. 6*.

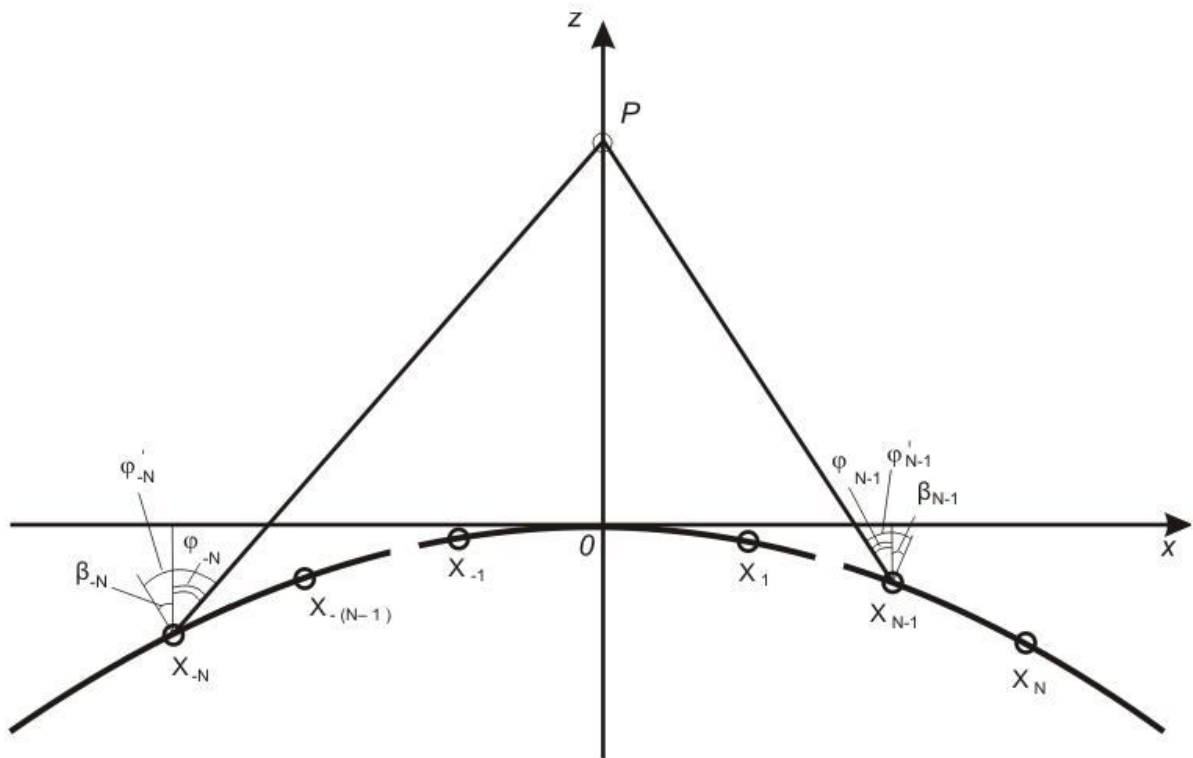


Рис. 6. Расположение излучателей в антенной решетке после деформации

Нахождение поля антенны, создаваемого системой элементарных линейных излучателей, в точке наблюдения P , сводится, в результате, к суммированию полей всех составляющих её источников с учетом амплитуд и фаз возбуждающих токов.

В соответствии с этим напряженность электрического поля E_{Σ} , создаваемого антенной решеткой, примет вид [1, 3]:

$$\mathbf{E}_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n \mathbf{E}_{\varphi_i}, \quad (1)$$

где i — номер излучателя; E_{φ_i} — составляющая электрического поля, создаваемая элементарным излучателем с индексом i ; $n = 2N$ — четное число излучателей.

Составляющая электрического поля E_{φ_i} , создаваемая i -м излучателем в направлении точки наблюдения P может быть определена как

$$E_{\varphi_i} = E_{0i} \cdot F(\varphi_i) \cdot \frac{e^{-jkr_i}}{r_i}, \quad (2)$$

где E_{0i} — амплитуда напряженности электрического поля создаваемого i -м излучателем у поверхности антенны; $F(\varphi_i)$ — уровень ДН i -го излучателя в направлении φ_i ; φ_i — угол наблюдения точки P относительно нормали к i —тому элементарному излучателю в его центре; $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число электромагнитной волны; λ — длина электромагнитной волны; r_i — расстояние от центра i -го излучателя до точки наблюдения P [6].

Диаграмма направленности $F(\varphi)$ продольного щелевого излучателя в плоскости **H** может быть описана формулой

$$F(\varphi) = \frac{\cos[(\pi/2) \cdot \sin \varphi]}{\cos \varphi} \quad (3)$$

В исследуемой модели считаем излучатели идентичными, пренебрегаем их взаимным влиянием и полагаем распределение токов неизменными во времени. На рассматриваемом рис. 6 центр излучающей поверхности антенны O совмещен с центром окружности, имеющий радиус равный расстоянию R от этого центра до точки наблюдения P . Такую окружность опишет радиус-вектор расстояния R при повороте антенны относительно направления на P на угол равный 360° , что соответствует условиям оценки ее характеристики направленности.

Учитывая то, что угол наблюдения точки P для каждого излучателя различный, то при равноамплитудном и синфазном возбуждении и идентичности характеристик направленности излучателей амплитуды и фазы отдельных составляющих электрического поля в точке P будут различными. С учетом принятых обозначений, пространственного размещения излучателей и точки наблюдения P получим следующие расчетные соотношения.

Координаты δ_p и z_p точки наблюдения P имеют следующие значения:

$$\delta_p = R \cdot \sin \varphi, \quad (4)$$

$$z_p = R \cdot \cos \varphi. \quad (5)$$

В свою очередь расстояние до точки наблюдения P от произвольного i -го излучателя r_i может быть определено как

$$r_i = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + z_p^2}, \quad (6)$$

где r_i — расстояния до точки P относительно фазового центра i -го излучателя.

Угол φ_i наблюдения точки P относительно нормали к оси Ox из фазового центра i -го излучателя при этом определится как

$$\varphi_i = \arccos(z_p / r_i). \quad (7)$$

С использованием полученных выражений было проведено исследование влияния отклонения антенной решетки от прямолинейной формы на ДН рассматриваемой антенной решетки

$$F(\varphi) = E_\Sigma(\varphi) / E_{\max}, \quad (8)$$

где $E_{\max} = E_\Sigma(0)$ — максимальный уровень напряженности электрического поля, равный для симметричных антенн его значению в направлении оси симметрии.

Для заданных гармонических воздействий, приложенных к излучающей поверхности антенной решетки, получены следующие отклонения излучателей Δy в направлении воздействия (табл. 1).

Табл. 1

№ щели	Δy , см		
	Δt	$2 \Delta t$	$3 \Delta t$
1	0	0	0
2	0,1	0,1	0,4
3	0,1	0,2	0,6
4	0,2	0,4	0,9
5	0,3	0,8	1,2
6	0,5	0,9	1,6
7	0,7	1,1	1,9
8	0,8	1,4	2,2
9	1,1	1,6	2,4
10	1,3	1,9	2,6
11	1,4	2	2,9
12	1,6	2,4	3,6
13	1,8	2,7	4,1
14	2,1	2,9	4,6

Здесь Δt — временной интервал, равный времени прохождения механической волной от края антенны до ее центра.

В соответствии с предложенной математической моделью расчеты были проведены с использованием формул (1)...(8) в оболочке MathCad. В результате исследований и расчетов было установлено, что модель антенны с заданными параметрами в отсутствие

вибрационных воздействий имеет ДН с шириной на уровне половинной мощности $2\varphi_{0,5} = 2,4^\circ$ (рис. 7, кривая 1), что соответствует результатам расчета по известным

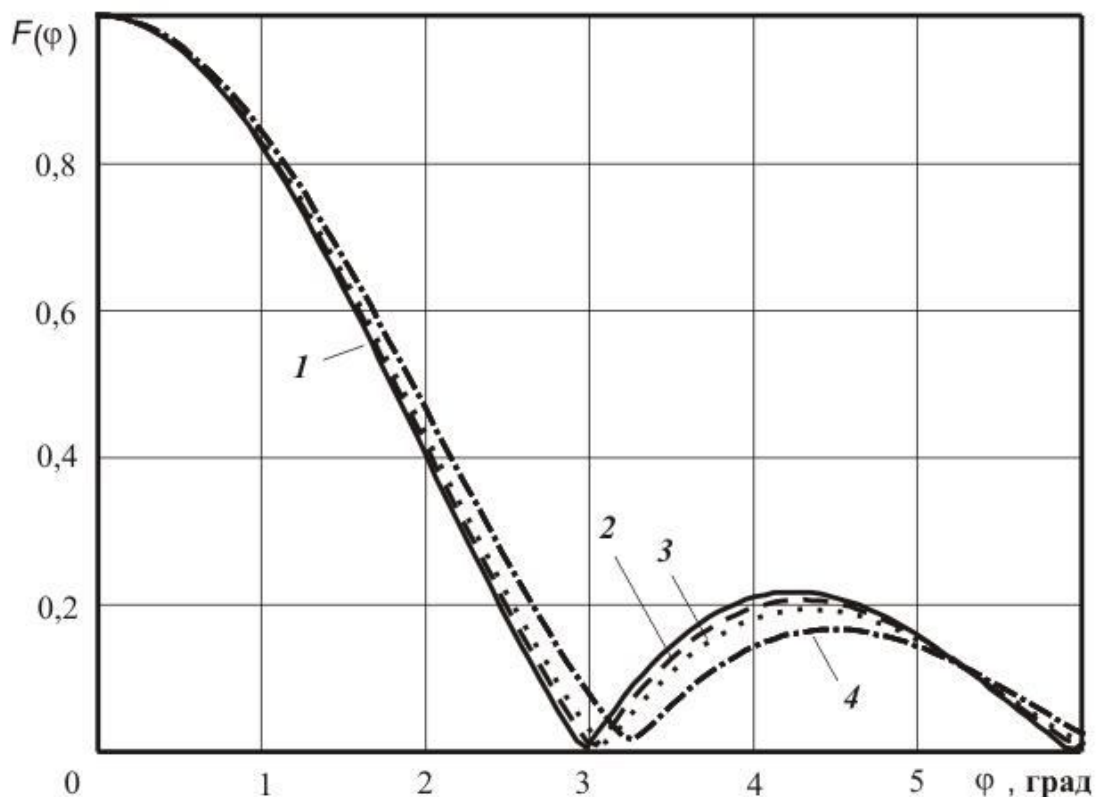


Рис. 7. Изменение ДН антенной решетки вследствие деформации

формулам для ДН линейной волноводно-щелевой антенной решетки [2].

При механических гармонических воздействиях с начальной фазой равной нулю, через один интервал дискретизации по времени Δt , равный времени прохождения механической волной расстояния от края антенны до ее центра, возникающая деформация профиля антенны приводит к следующим изменениям ДН (см. рис. 7, кривая 2): ширина ДН изменяется незначительно, но уже исчезают нулевые уровни в области боковых лепестков и изменяется уровень боковых лепестков. При исследовании результатов деформации для каждого следующего временного интервала Δt воздействие поперечных механических колебаний оценивалось для нового пространственного положения щелей профиля антенны полученного в предыдущий момент.

Расчеты деформации профиля антенны для моментов времени t , соответствующих его дальнейшему приращению с интервалом Δt дали следующие результаты. При $t = 2\Delta t$ (см. рис. 7, кривая 3) и $t = 3\Delta t$ (см. рис. 7, кривая 4), т.е. с увеличением t , наблюдается увеличение деформации профиля антенны и изменение ДН.

Отмеченные тенденции характерны для данного типа антенн, что указывает на адекватность предложенной математической модели, возможность ее использования для исследования влияния гармонических механических воздействий на характеристики

излучения антенной решетки и оптимизации ее конструкции. Таким образом, полученные результаты могут оказаться полезными при проектировании виброустойчивых волноводно-щелевых антенных решеток.

Литература

1. *Якимов А.Н.* Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий: Монография. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. — 260 с.
2. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов/ Под ред. *Д.И. Воскресенского*. — М.: Радио и связь, 1981. — 432 с.
3. *Абжирко Н.Н.* Влияние вибраций на характеристики радиолокационных антенн. — М.: Сов. радио, 1974. — 168 с.
4. *Яковлев С.А.* Моделирование влияния вибраций на характеристики направленности криволинейной антенны / *С.А. Яковлев, А.Н. Якимов*//. — Кн. трудов международного симпозиума "Надежность и качество". Т. 1.— Пенза: Инф.-изд. центр ПГУ, 2007. — С. 278–280.
5. *Кабисов К.С.* Колебания и волновые процессы: Теория. Задачи с решениями/ *К.С. Кабисов, Т.Ф. Камалов, В.А. Лурье*//. — М.: КомКнига, 2005. — 360 с.