

О низкочастотных пьезомеханических фильтрах

В последние годы вновь значительно возрос интерес разработчиков новых видов изделий космического приборостроения, радиосистем и других видов радиоэлектронной аппаратуры к комплексной микроминиатюризации применяемых в них электронных компонентов, в том числе пьезоэлектрических резонаторов и фильтров, особенно низкочастотного диапазона. При этом отмечается, что габариты, масса и механическая прочность пьезоэлектрических резонаторов и электромеханических фильтров на частоты от десятков до нескольких сотен килогерц не вполне отвечают современным требованиям, особенно при их использовании в аппаратуре специального назначения.

Риф МУРТАЗИН

Поэтому разработка и организация производств современных конструкций, особенно высокоизбирательных узкополосных электромеханических фильтров (ЭМФ), обладающих высокой механической прочностью колебательной системы, широко востребованы для многих видов вновь разрабатываемых систем связи и в приборостроении.

Достаточная механическая прочность конструкций колебательных систем таких фильтров обеспечивается миниатюризацией (уменьшением массы и размеров) используемых в них резонаторов. Добротность миниатюрных механических резонаторов достигает нескольких десятков тысяч, а температурный коэффициент частоты зависит

от физических свойств используемых материалов и находится в пределах $10^{-5} \dots 10^{-7}$ на 1°C . Долговременная стабильность частоты за 1 год, при использовании элинварных сплавов, обычно не превышает $(5-10) \times 10^{-6}$. Фильтрующая система электромеханического фильтра состоит из связанных между собой резонаторов (металлических, кремниевых, кварцевых и других).

Согласно общепринятым определениям пьезомеханический фильтр [1] представляет собой фильтр, резонаторы или вибраторы которого имеют между собой акустическую связь. Электромеханический частотный фильтр имеет в своем составе электромеханические преобразователи и механические резонаторы.

Пьезомеханические фильтры в зависимости от используемого типа колебаний (в резонансной системе) подразделяются на 3 основных типа:

- изгибные (по ширине или по толщине);
- крутильные;
- продольные.

Вибраторы изгибных колебаний используются на частотах от 500 Гц до 20 кГц. Вибраторы крутильных колебаний применяются при проектировании фильтров на частоты от 10 до 200–300 кГц, а вибраторы продольных колебаний — при проектировании ЭМФ на частоты до 800–1000 кГц.

Пьезомеханические фильтры обладают на частотах от сотен герц до сотен килогерц значительно большей шириной полосы пропускания, нежели пьезоэлектрические фильтры на основе пьезоэлектрических монокристаллов. ЭМФ обладают высокой стабильностью основных параметров и характеристик во времени при изменениях температуры окружающей среды.

На рис. 1 в качестве примера представлена фотография пьезомеханического фильтра с резонансной системой крутильного типа.

Использование современных технологий микроэлектроники и пьезоэлектроники (производство сверхчистых материалов и новых перспективных пьезоэлектриков, лазерные технологии и оборудование, новые пьезоэлектрические и высокочистые материалы, литографические способы формирования структур, МЭМС и НЭНС технологии и конструкции, плазмохимия, ионное травление и т. д.) позволяет многократно уменьшить размеры пьезомеханических фильтров, расширить их диапазон частот, повысить надежность и параметры, снизить себестоимость при массовом производстве, сократить время разработок и поставок.

На рис. 2 представлены частотные диапазоны использования пьезомеханических фильтров с различными типами резонансных систем и видов их колебаний.

Важной проблемой в совершенствовании ЭМФ является устранение побочных полос пропускания в электромеханических фильтрах на частоты 50–200 кГц с полосами пропускания 500–5000 Гц.

Улучшение моночастотности достигается при применении усложненных форм колебательных систем с гантельными резонаторами. Известно, что частота колебаний кручения практически не зависит от площади квадратного поперечного сечения резонатора, а частота изгибных и продольных колебаний существенно зависит от этих размеров.

Применение гантельных резонаторов сложной формы позволяет существенно повысить моночастотность ЭМФ (многократное подавление интенсивности колебаний на побочных частотах изгибных колебаний).

Основными достоинствами ЭМФ является высокая избирательность и малая неравномерность затухания в полосе пропускания,



Рис. 1. Пьезомеханический фильтр с резонансной системой крутильного типа

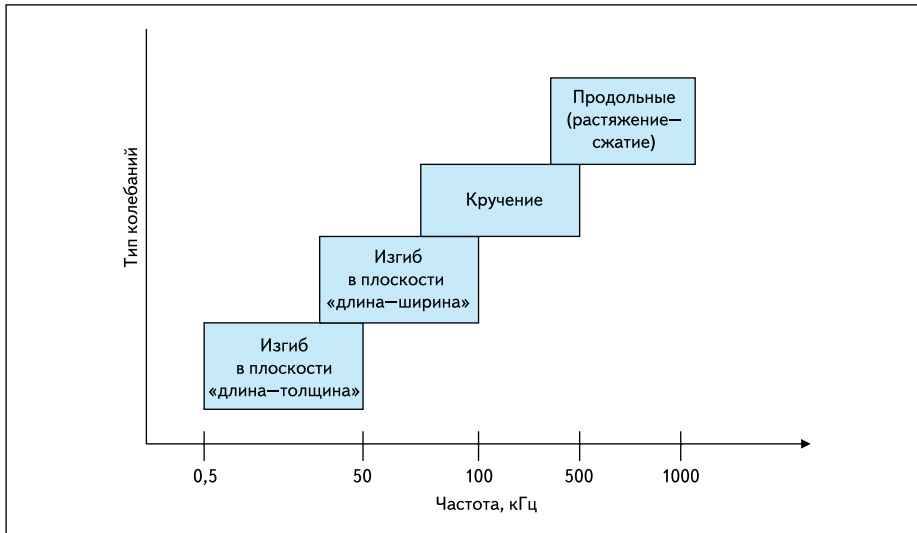


Рис. 2. Частотные диапазоны использования пьезомеханических фильтров

удовлетворительная стабильность электрических параметров и характеристик при воздействии температур и времени, малые габариты и вес, компактность колебательной системы. Применяемые при разработках пьезомеханических фильтров технологии и материалы постоянно совершенствуются, что позволяет улучшить их параметры и характеристики и уменьшить массу и габариты.

При проектировании и производстве ЭМФ применяются резонаторы с рабочими колебаниями изгиба (в плоскостях «длина – толщина» и «длина – ширина»), кручения, сдвига, продольные.

Расчет резонансных частот для изгибных колебаний по длине и ширине ведется по известным формулам:

$$f_{m0} = \frac{\pi h}{4l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu)^2}} \times A,$$

$$A = (m-0,5)^2,$$

где l — длина резонатора; m — номер гармоники; h — толщина или ширина резонатора; E , μ , ρ — параметры материала (модуль Юнга, плотность, коэффициент Пуассона); A — постоянная, зависящая от номера гармоники; $m = 2, 3, 4$ — число узловых по длине резонатора для 1-й, 2-й, 3-й гармоники колебаний по длине.

Естественно, что габаритные размеры ЭМФ определяются в первую очередь размерами резонаторов. Наименьшими размерами обладают резонаторы с рабочими колебаниями изгиба в плоскости «длина – толщина». Использование резонаторов в форме камертона позволяет уменьшить их размеры в 1,5–1,8 раза. В работе [2] предложен резонатор в форме сдвоенного камертона (Н-образный), который представляет собой две уравновешенные массы (стержни), соединенные гибкой перемычкой. Такие низкочастотные

резонаторы обладают высокой добротностью (ее значение приближается к добротности материала, из которого они изготовлены) и низкой чувствительностью к вибрационным и ударным нагрузкам.

Подавление побочных колебаний обычно проводится с помощью одного из следующих способов:

- выбор оптимального места присоединения элементов связи;
- крепление в узлах рабочих колебаний.

Следует отметить, что с точки зрения получения миниатюрных размеров и массы преимущества пьезоэлектрических преобразователей неоспоримы. Но в случаях, когда необходимо достижение максимальной температурной и долговременной стабильности частоты, предпочтительнее применять электромагнитные преобразователи.

Если при разработке фильтра основным приоритетом является уменьшение габаритов и массы, в качестве преобразователя нужно использовать пьезоэлектрик (например, пьезокерамику ЦТС-35, монокристаллы «сильных» пьезоэлектриков типа ниобата лития, танталата лития и т. д.).

Большую роль в обеспечении моночастотности пьезокерамического преобразователя играют его размеры и форма: укороченные пьезокерамические пластины или деленные на секции их электродные покрытия позволяют снизить (или полностью исключить) нежелательные виды колебаний.

Подавление высших гармоник рабочего колебания можно осуществить увеличением емкости преобразователя, но тогда происходит сужение полосы пропускания. Применение согласующих ползувеньев на входе и выходе фильтра существенно улучшает его моночастотность за счет подавления высших гармоник. С этой целью используются катушки индуктивности (при использовании пьезокерамических преобразователей) либо конденсаторы (при исполь-

зовании магнитных и магнитострикционных преобразователей).

Пьезокерамические резонаторы-преобразователи применяются в фильтрах с относительной полосой пропускания не более 3%.

Временная и температурная стабильность электрических параметров пьезомеханических фильтров определяет возможность их использования в радиоэлектронной аппаратуре, срок службы которой обычно более 15–25 лет, а температурные интервалы эксплуатации могут превышать 150 °С и более.

В качестве критериев стабильности АЧХ (амплитудно-частотной характеристики) обычно принимается стабильность средней частоты и минимального затухания в полосе пропускания.

Долговременная стабильность частоты резонаторов из элинварного сплава (ЭП-218) обычно не превышает $(5-10) \times 10^{-6}$ в год и определяется стабильностью модуля упругости резонансной системы.

Температурный коэффициент модуля упругости пьезокерамики имеет отрицательный знак и сравнительно большую величину. Поэтому при проектировании малогабаритных и миниатюрных фильтров следует применять сплавы с большим положительным коэффициентом модуля упругости.

При выборе марки пьезокерамики для изготовления преобразователей пьезомеханических фильтров следует учитывать такие требования, как:

- высокая механическая прочность;
- высокий пьезомодуль;
- стабильность диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих свойств в широком интервале рабочих температур и во времени;
- максимально высокая добротность и высокая температура точки Кюри.

Совокупности этих требований в наибольшей мере отвечает керамика марки ЦТС-35.

При необходимости изменения ТКЧ (температурный коэффициент частоты) вибратора используется упрочнение или разупрочнение его поверхностного слоя. Если необходимо изменить ТКЧ в сторону положительных значений, производится упрочнение поверхностного слоя, а в сторону отрицательных значений — разупрочнение (нанесение слоя припою или электрополировка). К припою или клею предъявляются следующие требования:

- минимальный температурный коэффициент модуля упругости;
- максимально возможная текучесть (для получения минимально возможного слоя по толщине);
- минимальный коэффициент линейного расширения.

Использование пьезокерамики, имеющей большой коэффициент линейного расширения, наиболее эффективно повышает температурную стабильность составных резонаторов при малой толщине пластин (менее 0,15 мм).

Применение наиболее стабильных пьезо-керамических материалов, например, ЦТС-35, и сплавов с положительным температурным коэффициентом модуля упругости позволяет уменьшить линейные размеры составных резонаторов-преобразователей. Для стабилизации упругих свойств используемой пьезокерамики необходимо применять ее отжиг, так как с увеличением времени и температуры обработки происходит процесс ее искусственного старения, стабилизируются упругие свойства, температурный коэффициент частоты меняет знак (с отрицательного на положительный). Такую обработку (снятие внутренних напряжений) можно производить как на отдельных пьезо-элементах, так и на готовых составных резонаторах-преобразователях. При уменьшении толщины пластины преобразователя происходит не только повышение температурной стабильности, но и существенное уменьшение долговременной нестабильности частоты фильтра.

Существенного снижения «старения» пьезомеханических фильтров можно достичь при условии крепления резонансных систем в «нейтральных» точках на их поверхности. Впервые этот метод был предложен более 50 лет назад американскими специалистами, а затем подробно описан и обобщен японскими учеными Оное и Takahara.

У резонаторов, совершающих продольные колебания растяжения — сжатия по длине, на расстоянии, равном $0,4l$, имеются нейтральные точки. Если расстояние крепления от конца пластины менее $0,4l$, происходит понижение резонансной частоты, а если это расстояние более $0,4l$, частота повышается. Этот эффект используется специалистами в области пьезотехники при конструировании низкочастотных кварцевых резонаторов.

Заключение

Современные достижения в области материаловедения и совершенствования микронанотехнологий позволяют значительно (в 3–10 раз) сократить размеры и повысить селективность электромеханических и пьезомеханических фильтров, увеличить объемы их использования в современных изделиях приборостроения, связи, измерительной техники и других областях науки и производства. ■

Литература

1. ГОСТ 1867084 «Фильтры пьезоэлектрические и электромеханические». Термины и определения, 1984.
2. Bakez H., Cressey I. R. H-shaped resonators // Electronics. 1967. NZO.