

УДК 539.3

ПОШИРЕННЯ АКУСТОЕЛЕКТРИЧНИХ ХВИЛЬ У СУЦІЛЬНОМУ НЕОДНОРІДНОМУ П'ЄЗОКЕРАМІЧНОМУ ЦИЛІНДРІ

Олександр Григоренко, Ігор Лоза, Світлана Сперкач, Анна Безугла

*Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України,
Національний транспортний університет,
Технічний центр НАН України*

ayagrigorenko1991@gmail.com, lozaigor1956@gmail.com,
svetlana@nasu.kiev.ua, bezuglaya.anna24@gmail.com

Кругові циліндричні п'єзокерамічні хвилеводи широко застосовуються в акустоелектроніці. Завдяки властивості п'єзокераміки перетворювати механічну енергію в електричну і навпаки, такі матеріали знаходять застосування в різноманітних областях науки та техніки: випромінювачі та антени в гідроакустиці; стабілізатори частоти в радіотехнічних засобах; електрофільтри та лінії затримки в радіо- і телефонному зв'язку; вимірювальні перетворювачі прискорень, мікродвигуни; для вимірювання рівнів вібрації та акустичної емісії в неруйнівній діагностиці; у якості п'єзотрансформаторів тощо.

Для збільшення довговічності хвилеводних характеристик у багатьох випадках вони мають неоднорідну структуру. Якщо на початку використовувались в основному шаруваті конструкції, то останнім часом в конструкції хвилеводів все частіше використовують функціонально градієнтні п'єзокерамічні матеріали. При цьому коефіцієнти, які описують фізико-механічні характеристики таких матеріалів є змінними величинами. І механіко-математична модель, яка описує задачу про поширення електроакустичних хвиль в хвилеводі, буде системою диференціальних рівнянь в частинних похідних зі змінними коефіцієнтами.

Розв'язок задачі про поширення акустоелектричних хвиль у суцільному циліндрі пов'язаний з необхідністю позбутися невизначеності у сингулярній точці $r = 0$. В науковій літературі представлено розв'язок даної задачі тільки для випадку осьової поляризації п'єзокераміки. Для отримання розв'язку використовується апарат спеціальних функцій. Та функція Бесселя, що містить особливість у вказаній точці $r = 0$, відкидається. Проте для випадку неоднорідного шаруватого циліндра використання даного підходу значно ускладню-

ється, а для випадку градієнтно неоднорідного матеріалу є просто неможливим. Також, вочевидь, виникнуть значні проблеми, якщо розглядати циліндр з радіальною поляризацією п'єзокераміки. В даній роботі запропоновано підхід, в основі якого лежить розбиття всієї множини точок циліндра на дві підмножини: області $0 < r \leq R$ та точки $r = 0$. Для першої області використовується стандартна система рівнянь, як і для порожнистого циліндра, а для того, щоб позбутися невизначеності у сингулярній точці, використовується правило Лопітала–Бернуллі. В результаті застосування такого підходу ми отримуємо дві системи рівнянь: одну – для регулярних точок і другу – для сингулярної точки. Для однорідного матеріалу циліндра результати чисельного аналізу вказаної задачі повністю збігаються з результатами, отриманими на основі апарату спеціальних функцій. Проте на основі запропонованого підходу ми можемо отримати розв'язок задачі про поширення акустоелектричних хвиль у функціонально градієнтному п'єзокерамічному матеріалі, як для випадку осової, так і для радіальної поляризації.

Представлено результати чисельного аналізу, як спектральних характеристик поширення вимушених осесиметричних електропружних хвиль, так і відповідних їм форм у суцільному п'єзокерамічному циліндрі з однорідного та неперервно неоднорідного матеріалу в випадку осової та радіальної поляризації на основі запропонованого дискретноконтинуального чисельно-аналітичного підходу. Розглянуто також вплив електричних граничних умов на поверхні циліндра на вказані характеристики.

PROPAGATION OF AN ACOUSTOELECTRIC WAVES IN A SOLID PIEZOCERAMIC CYLINDER

The propagation of forced axisymmetric waves in a solid inhomogeneous piezoceramic cylinder with axial polarization based on the linear theory of elasticity and the linear electro-mechanical coupling is investigated. A mechanical load to the lateral surface of the cylinder is applied and it is free of the electrodes. The case of the continuously inhomogeneous piezoceramic cylinder material is considered. The boundary conditions at singular point of a solid piezoceramic cylinder are formulated. The discretely continual analytical numerically approach to solve of the problems of the forced wave propagation in the piezoceramic solid cylindrical bodies is proposed. The three-dimensional problem of the theory of electroelasticity in the partial derivatives (by presenting components of the elasticity tensor, component of displacement vectors, electrical induction and electrostatic potential by running waves in the axial direction) is reduced to the boundary value problems for the system of the ordinary differential equations. The one-dimensional problem is solved by a stable method of discrete orthogonalization. The kinematic analysis of the propagation of forced electroelastic waves in a solid piezoceramic homogeneous and inhomogeneous cylinder is carried out.