

УДК 534-16

## МОДЕЛЬ ПАКЕТНОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С АРМИРУЮЩИМ БОЛТОМ

Мовчанюк А.В., Луговской А.Ф., Фесич В.П.

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

**Аннотация:** Рассмотрены основные особенности конструкции пакетного преобразователя Ланжевена. Для моделирования работы преобразователя предложено использовать метод эквивалентных четырехполюсников. Преобразователь Ланжевена будет представлен комбинацией четырехполюсников частотопонижающих накладок и армирующего болта и четырехполюсником пьезокерамики, дополненного электромеханическим трансформатором. В результате анализа граничных условий для сил и скоростей показано, что эквивалентные четырехполюсники частотопонижающих накладок и пьезокерамики должны соответствовать цепочечному соединению, а армирующего болта – смешанному. Такое соединение позволяет анализировать поведение преобразователя с учетом согласующего фильтра. Показано, что частота первого обертона будет определяться параметрами армирующего болта.

**Ключевые слова:** ультразвук, ультразвуковой пьезопреобразователь, схема замещения, электромеханические аналогии, граничные условия

Ультразвуковая технологическая аппаратура применяется для интенсификации химико-технологических процессов, протекающих в жидких средах [1]. Одним из основных ее узлов является электромеханический преобразователь, преобразующий электрическую энергию в энергию механических колебаний ультразвуковой частоты, которая вводится в технологическую жидкость. На сегодняшний день наибольшее распространение получили электромеханические преобразователи на основе пьезокерамики – пьезопреобразователи. Их основой является конструкция Ланжевена [2], состоящая из пьезоэлементов с двумя частотопонижающими накладками, которые стянуты в пакет с помощью армирующего болта (рис.1). Распространение данной конструкции объясняется тем, что применение армирующего болта позволяет создать в пьезокерамике предварительное сжатие. При этом пьезокерамика не работает в режиме растяжения, в котором она имеет значительно меньшую механическую прочность. Применение частотопонижающих накладок позволяет уменьшить угловую длину пьезокерамики, акустические потери в которой значительно больше акустических потерь в металле. Однако, преобразователь Ланжевена, помимо основной резонансной частоты (в преобразователе укладывается половина длины волны), будет иметь большое число побочных резонансов, вызванных различными волновыми сопротивлениями материалов накладок.

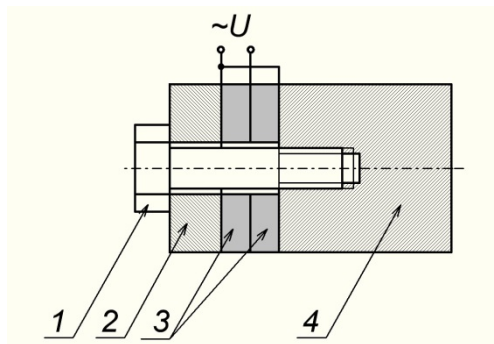


Рис.1. Конструкция пакетного преобразователя Ланжевена  
(1 – армирующий болт, 2 – тыльная накладка, 3 – пьезокерамика, 4 – рабочая накладка).

Для моделирования поведения пьезопреобразователя удобно пользоваться методом электромеханических аналогий [3], в котором электрический ток принимается эквивалентным колебательной скорости, а электрическое напряжение – силе. При этом

составные части преобразователя могут быть заменены эквивалентными электрическими четырехполюсниками с Т-образной схемой замещения (рис.2а). Пьезокерамика дополняется электромеханическим трансформатором, преобразующим электрические величины в механические и наоборот (рис.2б).

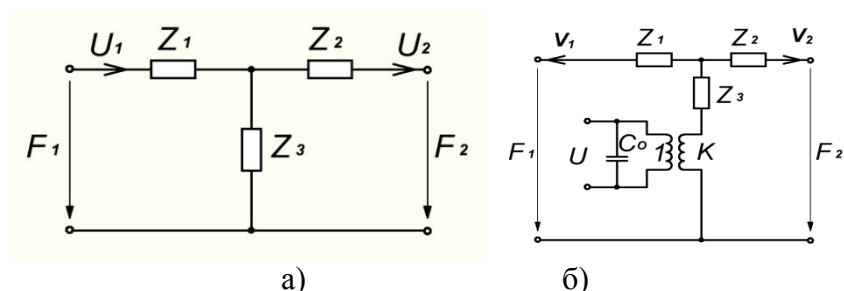


Рис.2. Эквивалентная схема частотопонижающих накладок (а) и пьезоэлемента (б)

Такой подход позволяет совместно моделировать поведение ультразвукового преобразователя и согласующего фильтра электронной системы управления [4] с применением пакетов моделирования работы электронных схем [5]. Основной проблемой является задание корректных граничных условий, соответствующих различным комбинациям включения эквивалентных четырехполюсников. Так, эквивалентные четырехполюсники частотопонижающих накладок и пьезокерамики будут соответствовать цепочечному соединению. Армирующий болт (рис.1) будет соединен с рабочей накладкой параллельно, а с тыльной – последовательно (рис.3).

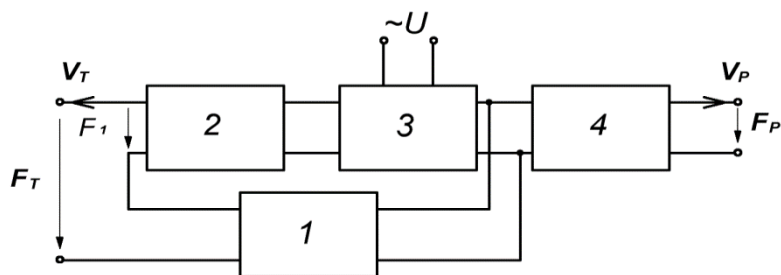


Рис.3. Эквивалентная схема преобразователя Ланжевена с учетом армирующего болта

Полученная эквивалентная схема хорошо интегрируется с современными пакетами симулирования работы электронных схем. Так было установлено, что первый обертона будет определяться длиной армирующего болта. При этом модель позволяет учитывать акустическую нагрузку и элементы схемы управления, влияющие на фазочастотные характеристики ультразвуковой технологической системы в целом.

**Список литературы:**

1. Gallego-Juarez J.A., Graff K.F. (2015) Introduction to power ultrasonics. Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound. pp. 1– 6. DOI: 10.1016/B978-1-78242-028-6.00001-6.
2. Antonio Arnau. (2004) Piezoelectric Transducers and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 329. DOI: 10.1007/978-3-662-05361-4.
3. Radmanovic Milan D., Mancic Dragan D. (2004) Design and Modeling of the Power Ultrasonic Transducers. MPI. pp.198. ISBN 86-80135-87-9.
4. Movchanyuk A., Fesich V., Sushko I., Vistyzenko Ye. (2016) The research of L-type matching filter parameters. 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications, pp. 1-5. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739596.
5. Yeong-Chin Chen, MenqJiun Wu, WeiKuo2 Liu (2007) PSPICE controlled-source models of analogous circuit for Langevin type piezoelectric transducer. Sci China-Phys Mech Astron. vol.50. no 1. pp.87 – 96. doi: 10.1007/s11433-007-0008-z.