

## LT-SPICE-МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Описывается LT-spice-модель акустической связи ультразвукового пьезоэлектрического излучателя и ультразвукового пьезоэлектрического приёмника. Эта модель позволяет моделировать электрические характеристики сложной пьезоэлектрической системы. Модель полезна при оптимизации потребляемой мощности акустической системы.

**Ключевые слова:** LT-spice, ультразвуковой элемент, электрический резонанс, амплитудно-частотная характеристика, моделирование.

Дасться опис LT-spice-моделі акустичного зв'язку ультразвукового п'єзоелектричного випромінювача та ультразвукового п'єзоелектричного приймача. Ця модель дозволяє моделювати електричні характеристики складної п'єзоелектричної системи. Модель корисна для оптимізації споживаної потужності акустичної системи.

**Ключові слова:** LT-spice, ультразвуковий елемент, електричний резонанс, амплітудно-частотна характеристика, моделювання.

The LT-spice model for an acoustic coupling piezoelectric ultrasonic transducer and piezoelectric ultrasonic receiver. This model allows us to simulate the electrical characteristics of a complex piezoelectric system. Model is useful in optimizing the power consumption speaker.

**Key words:** LT-spice, ultrasonic element, electrical resonance, frequency response, modeling.

**Постановка задачи.** В современных медицинских и технических устройствах широко используются электроакустические преобразователи, в частности в устройствах для навигации в воздушной среде, ультразвуковых исследованиях, дефектоскопах, системах охраны, ультразвуковых дальномерах [1].

С точки зрения электрических характеристик, такой преобразователь представляет достаточно сложную нагрузку для выходного каскада, и сложный источник сигнала для входного каскада электронных усилителей. Электроакустические элементы имеют определенные зависимости импеданса от частоты с резонансами на частотах механического и электрического резонансов системы. В реальных системах к резонансным свойствам активного элемента, например на основе пьезоэлектриков [2; 3], добавляются резонансные свойства механических элементов системы. Задача существенно усложняется в случае акустической (механической) связи

между отдельными элементами электроакустической системы.

Данная работа ставит своей целью разработку SPICE-модели электроакустической системы включающей в себя ныне широко распространенные ультразвуковые головки приемника и передатчика на частоту 40KHz для воздушной среды.

**Модель ультразвукового элемента.** В простейшем случае, когда имеется один главный резонанс, электроакустическую систему можно заменить резонансным LC-контуром с двумя емкостями, индуктивностью и сопротивлением (рис. 1). Параметры электрических элементов определяют параметры резонанса – резонансные частоты, ширину и амплитуды резонансной кривой.

На рис. 1 приведена LT-spice-модель электроакустического элемента.

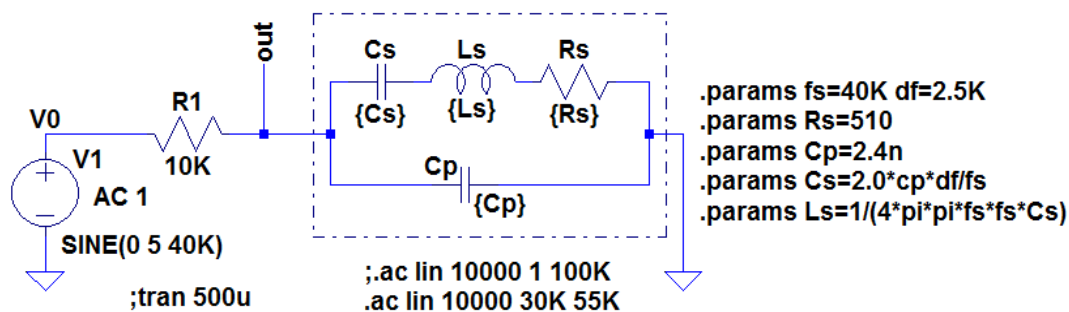


Рис. 1. LT-spice-модель ультразвукового элемента

Амплитудно-частотная характеристика ультразвуковых элементов (рис.2) определяется резонансом токов (определяется параллельным соединением конденсаторов – C')

и резонансом напряжений (определяется последовательным соединением конденсаторов – C'').

$$\omega = \frac{1}{L \cdot C},$$

$$\omega = 2\pi f,$$

$$C' = C_s + C_p, \quad C'' = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_p}$$

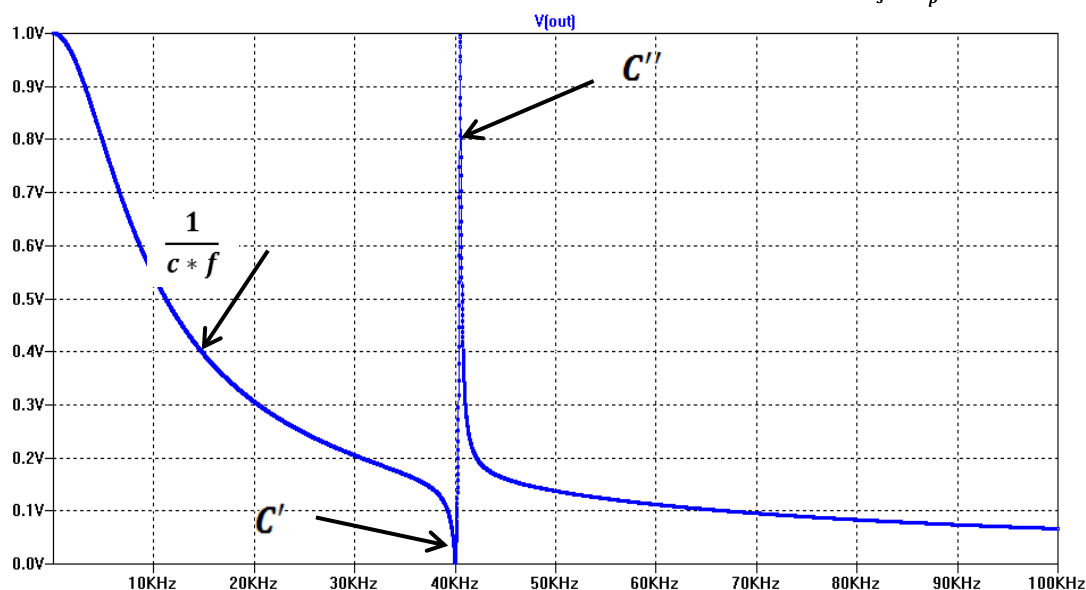


Рис. 2. АЧХ ультразвукового элемента

**Стенд для исследования акустической связи.** Для исследования импеданса и акустической связи ультразвуковых головок создан стенд на базе МК-duino (рис.3). Экспериментальные частотные зависимости электрического импеданса снимались путем измерения напряжения на элементе включенного в цепь генератора переменной частоты последовательно с резистором с высоким значением активного сопротивления (режим псевдо стабильного тока).

Измерительный стенд реализован на следующих элементах:

- микроконтроллерная плата с USB-интерфейсом. Выполняет функции: управляемого генератора напряжения (меандр) в диапазоне 0-8 MHz; цифро-аналогового преобразования сигнала; приема команд на изменение частоты; передачи результатов измерения на управляющий компьютер;
- усилитель и детектор. Выделяет огибающую амплитуды высоко частотных сигналов;
- персональный компьютер со специально разработанным программным обеспечением для выполнения функций виртуального частотного анализатора.

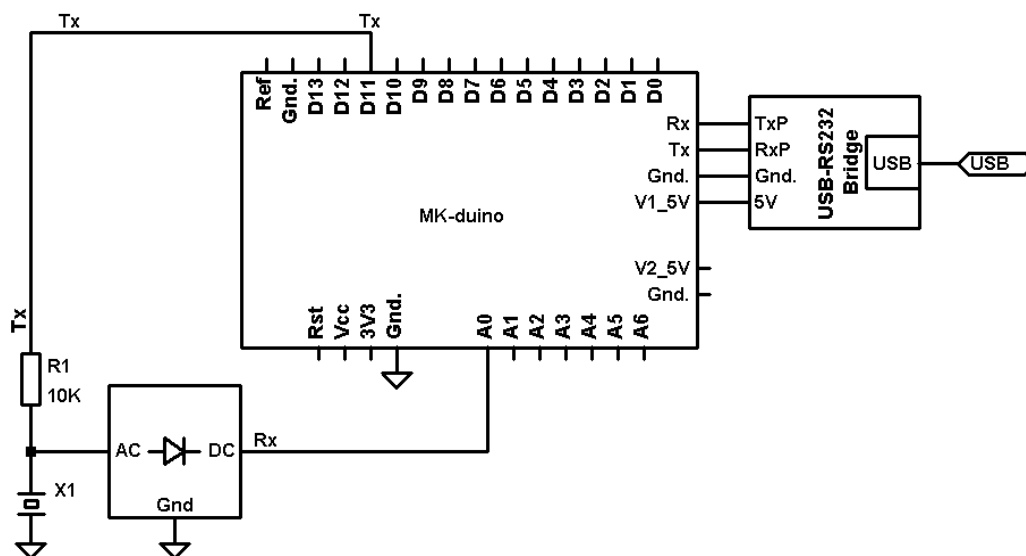


Рис. 3. Схема подключения генератора сигналов с детектором для исследований частотной зависимости импеданса элемента X1

В стенде были использованы передающая и принимающая ультразвуковые головки на 40 KHz, для исследования электрического резонанса на каждой головке и их акустической связи. Реальные ультразвуковые элементы с которых снимали характеристики имеют такие паспортные данные (табл. 1). На графиках изображены импеданс (красным Rx, синим Tx) и акустическая характеристика (слева чувствительность, справа создаваемое звуковое давление на расстоянии

30 см, 10 В среднеквадратическое значение) (рис. 4, рис. 5). Нужно отметить, что в таких ультразвуковых элементах резонанс определяется не резонансом пьезоэлектрика, а акустическим резонатором головки. Это обусловлено строением элемента. Конический рупор согласует акустический импеданс пьезоэлектрика с акустическим импедансом резонатора. Частота самого пьезоэлектрика намного выше чем 40 KHz.

Таблица 1

Паспортные данные ультразвуковых головок

400ST160	Передающая ультразвуковая головка
400SR160	Принимающая ультразвуковая головка
Резонансная частота	40.0±1.0KHz
Полоса пропускания (-6dB)	400ST160 400SR160
Чувствительность принимающей головки at 40.0KHz 0dB = 1 volt/mbar	-65dB
Емкость на 1KHz ±20%	2400 pF
Максимальное среднеквадратическое значение	20Vrms
Общий угол наклона -6dB	55°

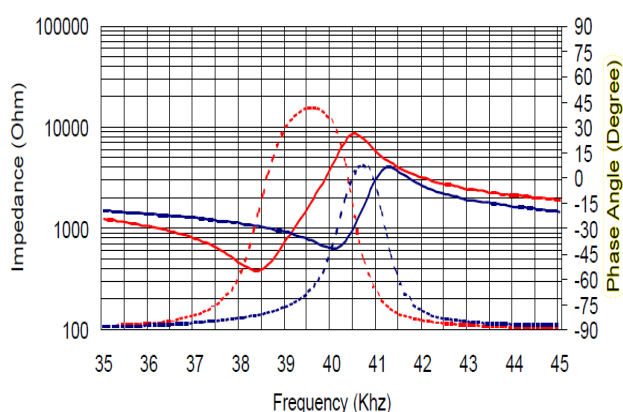


Рис. 4. Импеданс ультразвуковых головок

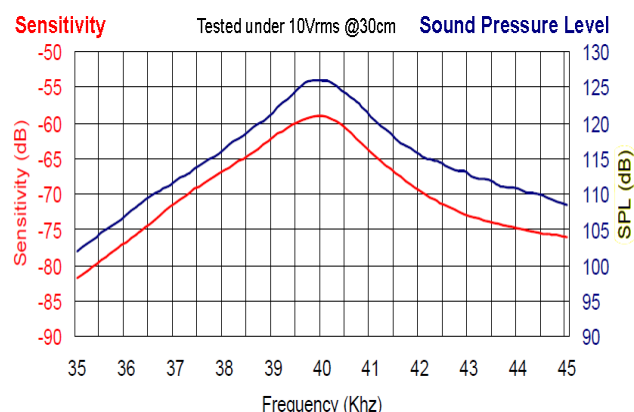
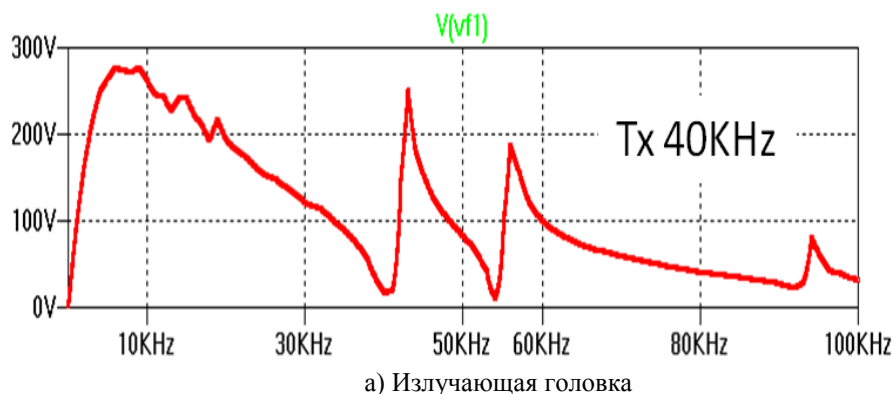


Рис. 5. Акустична характеристика ультразвуковых головок

С помощью этого стенда были измерены АЧХ реальных ультразвуковых головок (рис. 6).



а) Излучающая головка

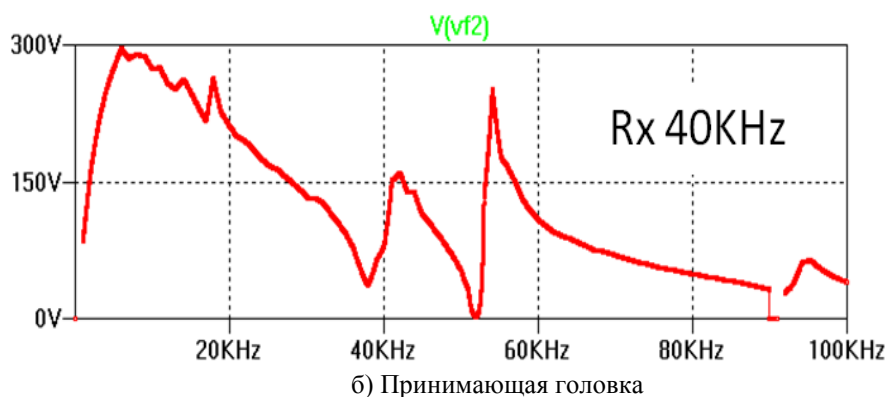


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики реальных ультразвуковых головок

На АЧХ ультразвуковых головок видно, что кроме основного резонанса присутствуют также дополнительные гармоники, перед резонансом, и всплески после него. Очевидно, что всплески после резонанса это резонансы обусловленные строением ультразвуковых элементов.

**Результаты моделирования.** Изменяя параметры RLC в модели LTspice, методом подбора были получены частотные характеристики максимально совпадающие с характеристиками реальных элементов (рис. 7). С

полученных характеристик видно, что резонанс токов и напряжений ультразвуковых головок подобран достаточно точно, однако на АЧХ реальных головок присутствуют еще дополнительные резонансы. Это обусловлено строением элемента. Для получения дополнительных резонансов будут добавлены в модель дополнительные резонансные контуры и проследить как они влияют на параметры основного контура, что будет проделано в следующей работе.

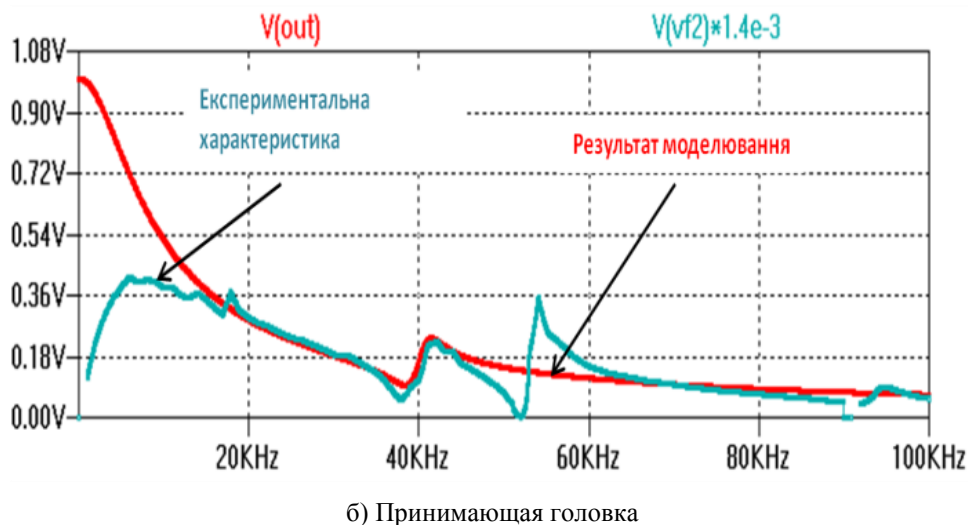
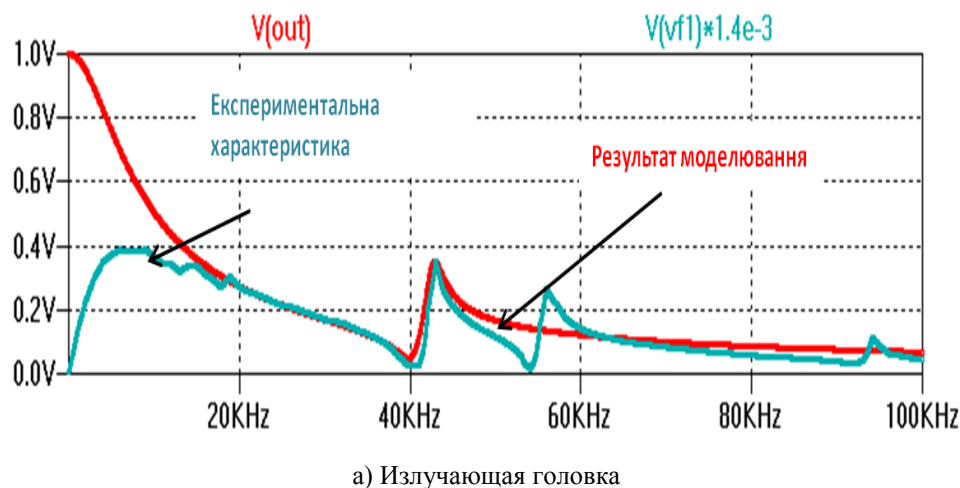


Рис. 7. Результаты моделирования

**Акустическая связь.** Для акустически связанных элементов в модель необходимо включить связь между излучающей и принимающей головками, которая обеспечивается индуктивной связью.

На рис. 8 приведен один из вариантов предлагаемой LTspice-модели [4] акустической связи на основе индуктивной связи между контурами соответствующих элементов.

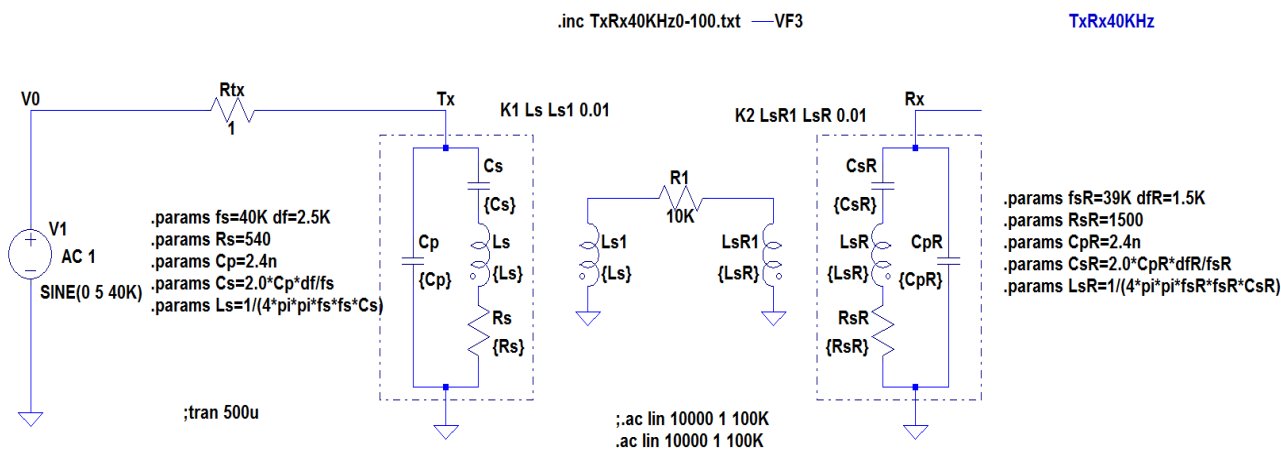


Рис. 8. LT-spice-модель акустической связи электроакустических элементов

Передающий элемент моделируется LC-контуром со своей резонансной частотой, а приемный – со своей. Соответствующие частотные зависимости импеданса приведены на рис. 9а. Акустическая связь моделируется слабой индуктивной (трансформаторной) связью с помощью дополнительных обмоток связи. Ослабление акустического сигнала в воздухе задается активным сопротивлением.

Параметры элементов модели были подбирались в моделях пинирующей и предающей головок. Характерно, что резонансные частоты головок не совпадают (рис. 9б).

На рис. 9б показан пример окна программы виртуального частотного анализатора с результатами измерений напряжений на ультразвуковых приемо-передающих элементах в режиме измерения электрического импеданса и акустической связи.

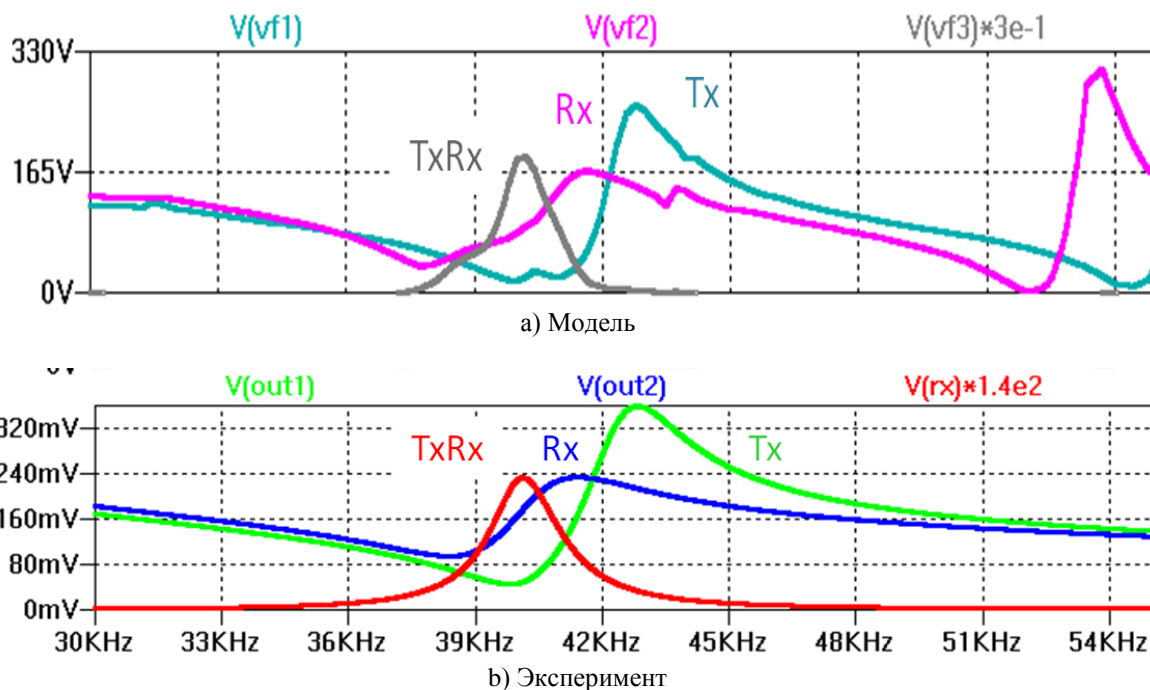


Рис. 9. Результаты моделирования и экспериментальных измерений частотных характеристик.

#### Основные результаты и выводы:

Нельзя не отметить, что частотные зависимости реальных элементов значительно сложнее частотных зависимостей простого резонансного контура. Экспериментальные частотные зависимости импеданса имеют не

один а несколько резонансов. В частности, приемный Rx-элемент имеет более сильный резонанс на частоте значительно выше рабочей, который оказывает заметное влияние на область рабочих частот.

Тем не менее, результаты расчетов по предлагаемой модели качественно подобны результатам экспериментальных измерений. В частности, согласуется расположение резонансных частот по модели с экспериментом. А именно: максимум Tx-Rx сигнала акустической связи реализуется вблизи резонанса тока передающего Tx-элемента (минимум напряжения) и резонанса напряжения приемного Rx-элемента.

Это позволяет надеяться на успешное использование предлагаемой модели при оценках параметров электронных схем с ультразвуковыми электроакустическими приемопередатчиками. В частности при

проектировании схем ультразвуковой локации и детектирования объектов в воздушной среде.

Также нужно отметить, что при моделировании акустической связи оказалось удачным и возможным использование трансформаторной связи. В дальнейшем, чтобы подтвердить использование именно трансформаторной связи, будет проведена проработка данных на более совершенной модели, которая учитывает физическую связь электрических и акустических свойств системы подобно тому, как это сделано в [2; 3]. Также будет рассмотрено согласование импедансом рупора и резонатора.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кубов В. И. К проблеме использования ультразвуковых локаторов для навигации слепых / В. И. Кубов, С. И. Шиян // Біофізичні стандарти та інформаційні технології в медицині. Одеський національний медичний університет. – 2011. – С. 114–116.
2. Kubov V. I. Piezoelectric Echo System LTspice-model / V. I. Kubov // KPI. Electronics and Nanotechnology. Proceedings of the XXXI International Scientific Conference, ELNANO. – 2011. – P. 117. ELNANO 2011.pdf
3. Кубов В. И. Моделирование пьезоэлектрических и акустических элементов в пакете LTspice/SwCad / В. И. Кубов // Наукові праці. т. 163, вип. 151. Техногенна безпека. Миколаїв : ЧДУ ім. П. Могили. – 2011. – С. 67–73.
4. Кубов В. И. Исследование схем импульсных источников питания в SwCAD/Ltspice / В. И. Кубов // Киев : МК-Пресс, СПб : КОРОНА-БЕК, 2010. – 208 с.

Рецензенты: **Кутковецкий В. Я.**, д.т.н., профессор;  
**Сирота О. А.**, к.т.н., доцент.

© Алімова М. Ф., Кубов В. І., 2012

Дата надходження статті до редколегії 27.11.2012 р.

**АЛІМОВА Маргарита Федорівна** – магістрантка ЧДУ ім. Петра Могили, м. Миколаїв.

**Коло наукових інтересів:** електронні прилади для контролю середовища та біофізичних параметрів.

**КУБОВ Володимир Ілліч** – к.ф.-м.н., доцент кафедри медичних приладів та систем, ЧДУ ім. Петра Могили, м. Миколаїв.

**Коло наукових інтересів:** електронні прилади для контролю середовища та біофізичних параметрів.