

## Литература

1. Лебедев, А. Н. Легковесный алгоритм защитного кодирования – NASH / А. Н. Лебедев, А. М. Карондеев, А. А. Козлов // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 56–64.
2. Лебедев, А. Н. Обобщенный протокол Диффи-Хеллмана с аутентификацией сторон / А. Н. Лебедев // Международная алгебраическая конференция, посвященная 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Куроша. : тезисы докладов. – М.: Издательство МГУ, 2018. – С. 123–127.
3. Лебедев, А. Н. Новая арифметика конечного коммутативного кольца и ее использование в криптографии / А. Н. Лебедев // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 49–63.
4. Лебедев, А. Н. Новый протокол выработки общего секрета / А. Н. Лебедев, А. О. Кокорин // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 97–104.
5. Лебедев, А. Н. Методы защитного кодирования и аутентификации данных в организации биржевых торгов / А. Н. Лебедев // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 65–89.

УДК 534-16; 534-8:621.9.048.6

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ  
РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ТИПОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ**  
Степаненко Д.А.<sup>1</sup>, Бунчук К.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
<sup>2</sup>РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Представлены результаты работ по исследованию и практической реализации новых типов ультразвуковых колебательных систем на основе кольцевых упругих элементов. Описаны механико-математические и компьютерные методы моделирования колебаний и методика экспериментального определения эксплуатационных характеристик кольцевых волноводов-концентраторов, обеспечивающих усиление ультразвуковых колебаний по амплитуде. Рассмотрены перспективные направления их применения в технике и медицине и преимущества по сравнению с традиционно применяемыми стержневыми концентраторами.

**Ключевые слова:** ультразвуковые концентраторы, кольцевые волноводы, усиление колебаний.

**PHYSICAL, MATHEMATICAL AND ENGINEERING ASPECTS  
OF THE DEVELOPMENT OF NOVEL ULTRASONIC VIBRATORY SYSTEMS  
FOR APPLICATION IN ENGINEERING AND MEDICINE**  
Stepanenko D.<sup>1</sup>, Bunchuk K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University  
<sup>2</sup>State Unitary Innovative Enterprise “Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”  
Minsk, Belarus

**Abstract.** The article presents results of the works on the study and practical implementation of novel ultrasonic vibratory systems based on application of ring-shaped elastic elements. It describes mechanical-mathematical and computer methods used for modelling of vibrations and methodology used for experimental determination of operational characteristics of ring-shaped waveguides ensuring amplification of ultrasonic vibrations amplitude. Potential applications of ring-shaped waveguides in engineering and medicine and their advantages over traditionally used bar waveguides (horns) are considered.

**Key words:** ultrasonic horns, ring-shaped waveguides, amplification of vibrations.

*Адрес для переписки:* Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
*e-mail:* dstepanenko@bntu.by

Низкочастотные ультразвуковые колебания высокой интенсивности с частотой от 20 до 100 кГц и интенсивностью более 1 Вт/см<sup>2</sup> являются эффективным средством повышения производительности и точности выполнения многих технологических операций, таких как обработка металлов давлением и резанием, размерная обработка хрупких материалов, очистка деталей от загрязнений, сварка и пайка. Ультразвуковые аппараты и инструменты также находят широкое применение в медицине, в частности в общей и сердечно-сосудистой хирургии используются

хирургические инструменты, рабочим окончанием которых сообщаются ультразвуковые колебания, что позволяет снизить травматичность хирургических операций за счет обеспечения гемостатического эффекта и селективности разрушения патологических тканей. С учетом широкого спектра практических применений ультразвука значительный интерес со стороны инженерного сообщества вызывают проблемы разработки и внедрения новых типов ультразвуковых колебательных систем (УЗКС), в частности, в БНТУ проводятся работы по ис-

следованию и практической реализации УЗКС на основе кольцевых упругих элементов.

Идея применения кольцевых упругих элементов в ультразвуковой технике не является принципиально новой и описана в ряде литературных источников, однако физико-математические аспекты практической реализации этой идеи являются недостаточно исследованными. В частности, до недавнего времени отсутствовали исследования, посвященные возможности применения кольцевых упругих элементов в качестве волноводов-концентраторов, обеспечивающих усиление ультразвуковых колебаний по амплитуде. Традиционно в ультразвуковой технике усиление колебаний по амплитуде реализуется с помощью стержневых концентраторов, представляющих собой осесимметричные стержни с изменяющейся в осевом направлении продольной жесткостью, что технически достигается за счет геометрического профилирования стержня (осевого изменения площади его поперечного сечения) или за счет создания осевого градиента модуля продольной упругости. Недостатками таких концентраторов являются значительные масса и габаритные размеры (особенно в области низких частот). Усилительная функция кольцевых волноводов-концентраторов реализуется за счет окружного изменения их изгибной жесткости, что, как и в случае стержневых концентраторов, может достигаться путем геометрического профилирования либо путем создания градиента физико-механических свойств материала. При этом концентратор временно трансформирует создаваемые ультразвуковым преобразователем продольные колебательные смещения в изгибные, усиливая их по амплитуде, а затем снова трансформирует их в продольные колебания, сообщаемые рабочему инструменту.

Простейшими конструктивными вариантами кольцевых волноводов-концентраторов являются кольцевые упругие элементы с параллельными плоскими поверхностями и эксцентричным взаимным расположением цилиндрических поверхностей и кольцевые упругие элементы с коаксиальными цилиндрическими поверхностями и наклонными плоскими поверхностями. Такие концентраторы являются простыми в изготовлении и имеют массу и габаритные размеры, значительно меньшие по сравнению со стержневыми концентраторами (например, габаритные размеры стержневых концентраторов из среднеуглеродистой стали с собственной частотой колебаний 20 кГц составляют порядка 120 мм, в то время как диаметр кольцевого концентратора с той же собственной частотой может быть сокращен до 40 мм и менее).

Интересной с практической точки зрения также представляется возможность частотного согласования кольцевых концентраторов с ультразвуковым преобразователем путем изменения статической нагрузки на связанный с концентратором рабочий инструмент: возникающая при этом статическая деформация будет приводить к смещению амплитудно-частотной характеристики

(АЧХ) концентратора, практически не оказывая влияния на АЧХ преобразователя, так как продольная жесткость преобразователя существенно выше изгибной жесткости концентратора.

Для описанных выше конструктивных вариантов кольцевых волноводов-концентраторов были разработаны компьютерные и механико-математические модели их колебаний, позволяющие определять основные эксплуатационные характеристики концентраторов, такие как собственные частоты колебаний и значения коэффициента усиления колебаний по амплитуде. Моделирование производилось с помощью метода конечных элементов (МКЭ) с применением программы COMSOL Multiphysics и с помощью метода гармонического баланса (МГБ), позволяющего представить распределение параметров колебаний по длине концентратора в полуаналитическом виде с использованием многочленов Фурье. При этом было показано, что МГБ дает наиболее точные результаты при использовании механико-математической модели, основанной на уравнениях изгибных колебаний типа Тимошенко, дополнительно учитывающих по сравнению с более простыми уравнениями типа Эйлера-Бернулли такие факторы, как растяжимость нейтральной оси, инерцию вращения поперечного сечения и сдвиговые напряжения. При этом наличие собственных форм колебаний, связанных с растяжением нейтральной оси, предсказывается только при использовании уравнений типа Тимошенко.

Для подтверждения результатов моделирования была разработана методика экспериментального определения эксплуатационных характеристик кольцевых волноводов-концентраторов, основанная на ударном возбуждении колебаний с последующей регистрацией отклика волновода с помощью пленочного пьезоэлектрического датчика, конформно закрепленного на его поверхности посредством адгезионного соединения. На основе теории контактного взаимодействия упругих тел при ударе были обоснованы параметры ударного элемента, необходимые для возбуждения колебаний в требуемом частотном диапазоне (до 50 кГц). Предложенная методика также позволяет определять механическую добротность концентратора на каждой из собственных частот колебаний.

Концентраторы с градиентом физико-механических свойств материала могут быть практически реализованы путем сварки двух кольцевых сегментов из разнородных материалов, в частности, были изготовлены опытные образцы таких концентраторов путем сварки трением с перемешиванием. Для подобных составных концентраторов разработаны модели их колебаний, основанные на применении МКЭ, МГБ и метода передаточных матриц. На основе разработанных моделей показано, что усиление колебаний по амплитуде составными кольцевыми концентраторами обеспечивается при их работе на собственных формах колебаний, связанных с растяжением нейтральной оси. При

этом зависимость коэффициента усиления от центрального угла входного сегмента концентратора характеризуется наличием ряда локальных максимумов, что дает возможность оптимизации концентратора по коэффициенту усиления путем варьирования его геометрических параметров.

Анализ вынужденных колебаний кольцевого упругого элемента постоянной изгибной жесткости (равнотолщинного кольца из однородного материала) под действием сосредоточенной нагрузки показывает, что он также может выполнять усилительную функцию при условии работы в окolorезонансном режиме, то есть при наличии рассогласования между собственной частотой его колебаний и частотой вынуждающего воздействия (рабочей частотой ультразвукового преобразователя). Колебания концентратора будут иметь при этом многомодовый характер, то есть в нем будет одновременно возбуждаться множество собственных форм колебаний. Доминирующими по амплитуде будут моды, собственные частоты которых наиболее близки к частоте вынуждающего воздействия. Вследствие противофазности этих мод их сложение будет приводить к снижению

амплитуды во входном сечении концентратора и ее увеличению в диаметрально противоположном выходном сечении, что соответствует усилению колебаний по амплитуде.

Потенциальными практическими применениями кольцевых волноводов-концентраторов являются ультразвуковая размерная обработка, ультразвуковая сварка проволочных выводов изделий микроэлектронной техники и ультразвуковая хирургия. В частности, известны исследования В.П. Лугового и И.В. Лугового, демонстрирующие эффективность применения кольцевых упругих элементов для повышения производительности ультразвуковой размерной обработки хрупких неметаллических материалов. Опытный образец УЗКС с кольцевым концентратором также прошел предварительные испытания на базе ОАО «Планар-СО», где имеются перспективы его применения в установках ультразвукового присоединения выводов. В ультразвуковой хирургии применение кольцевых концентраторов вместо традиционно используемых стержневых дает возможность повышения эргономичности хирургических инструментов за счет снижения их массы и габаритных размеров.

УДК 681.2

#### К ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА БЕЛОРУССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА Сервачинский И.Ю., Свистун А.И.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Статья посвящена истории приборостроительного факультета БНТУ, занимающегося подготовкой высококвалифицированных специалистов в области приборостроения.

**Ключевые слова:** приборостроение, приборостроительный факультет, кафедра, специальность.

#### TO THE HISTORY OF THE CREATION OF THE INSTRUMENTATION ENGINEERING FACULTY OF BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY Servachynski I., Svistun A.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** The article deals with the history of the Instrumentation Engineering Faculty of the Belarusian National Technical University that trains highly qualified specialists in the field of instrumentation engineering.

**Key words:** instrumentation, instrumentation engineering faculty, department, specialty.

*Адрес для переписки: Сервачинский И.Ю., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: servachinskij@bntu.by*

Приборостроительный факультет – это структурное подразделение Белорусского национального технического университета, ведущее подготовку специалистов высшей квалификации по комплексу специальностей и специализаций приборостроительного профиля. Будучи одним из самых молодых факультетов БНТУ, приборостроительный факультет имеет свою историю и свои традиции.

Родоначальницей всех приборостроительных специальностей БНТУ (тогда – Белорусский политехнический институт, БПИ) явилась кафедра

«Приборы точной механики», которая была открыта в 1961 г. на машиностроительном факультете Белорусского политехнического института. Первым заведующим кафедрой, возглавлявшим ее на протяжении 23 лет, был заслуженный работник высшей школы Республики Беларусь, профессор С.С. Костюкович.

Ускоренное развитие промышленности БССР в 1970-е гг. и увеличение значения приборостроения привели к росту и совершенствованию соответствующего направления высшего технического образования. Флагманом в данной сфере являлся