

***Прошкин Виктор Николаевич***

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный  
технологический университет»

г. Пенза, Пензенская область

***Магомедова Эльмира Асадулаевна***

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный  
технологический университет»

г. Пенза, Пензенская область

***Прошкина Людмила Андреевна***

канд. экон. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет»

г. Пенза, Пензенская область

***Магомедова Мадина Асадуллаевна***

аспирант

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный  
технологический университет»

г. Пенза, Пензенская область

## **СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ МАГНИТОУПРУГИМ ВОЛНОВОДАМ**

*Аннотация:* магнитоупругий преобразователь параметров движения как система взаимосвязанных элементов объединяет множество конструктивных элементов, определяющих его свойства как единой измерительной системы. Одним из его основных элементов является цилиндрический магнитоупругий волновод. В работе показано влияние на волновод внутренних дестабилизирующих факторов и внешних возмущающих воздействий различной физической природы и определены пути нейтрализации их влияния.

*Ключевые слова:* магнитострикционный преобразователь, магнитоупругий волновод, комплексные исследования, дестабилизирующие факторы, возмущающие воздействия.

Магнитострикционные преобразователи параметров движений (МППД) на крутильных магнитоакустических волнах с использованием эффектов Видемана-Виллари находят широкое применение в современных системах автоматического контроля и управления. Они обеспечивают преобразование измеряемых величин – линейных перемещений в унифицированные электрические сигналы (ШИМ – сигнал, параллельный  $N$ -разрядный двоичный код, токовый сигнал, напряжение постоянного тока, и т. п.) [1, 4, 5, 9–12, 15–17].

Наиболее широко магнитострикционные преобразователи линейных перемещений на крутильных магнитоакустических волнах применяются в следующих технических системах [6–8, 13, 14, 18, 20–24]:

- в элементах обратной связи электрогидравлических приводов;
- в устройствах измерения и контроля уровня жидких сред;
- в технологических и испытательных установках;
- в системах измерения осевых смещений роторов электрических машин;
- в устройствах телеметрии и диагностики законов управления технических систем;
- в устройствах контроля параметров движений динамических систем.

Совокупность элементов МППД подвержена со стороны окружающей среды множеству возмущений, под действием которых изменяются их параметры, а, следовательно, и характеристики МППД в целом. Магнитострикционный преобразователь как система взаимосвязанных элементов объединяет множество конструктивных элементов, определяющих его свойства как единой измерительной системы. В качестве одним из основных элементов МППД можно выделить цилиндрический магнитоупругий волновод (МУВ).

Учитывая, что свойства МППД в целом определяются как взаимодействием его составных частей, так и свойствами его отдельных элементов, проведем

наряду с анализом МППД как единой системы исследования его отдельных элементов с целью определения путей уменьшения или исключения влияния на его характеристики основных возмущающих факторов, повышения метрологических характеристик преобразователя до уровня, определяемого совокупностью требований к МППД как к элементу системы управления.

*Систематизация требований, предъявляемых к цилиндрическим магнитоупругим волноводам.* В измерительных преобразователях, входящих в состав МППД определяющим конструктивным элементом является МУВ, изготовленный из специальных ферромагнитных магнитострикционных материалов [2]. В процессе измерения физического параметра перемещения, волновод, будучи основным преобразующим элементом, обуславливает общую надежность и точность магнитострикционного преобразователя как системы взаимосвязанных элементов.

Использование МППД в СУ, работающих в специальных условиях эксплуатации, требует от них соответствия определенным техническим нормам [2, 9–11]. Если прежде основное внимание уделялось получению долговременной стабильности параметров при относительном постоянстве температуры и отсутствии других внешних возмущающих воздействий (ВВВ), то в настоящее время определяющим становится требование стабильности выходных характеристик МППД, как в процессе воздействия климатических, механических и других факторов, так и после их прекращения. Это потребовало поиска новых конструкторско-технологических решений. Достижение этого возможно посредством усовершенствования технологии получения материалов основных элементов МППД. Основные параметры материалов цилиндрического МУВ, определяющие свойства преобразователя как единой измерительной системы, – это коэффициенты электромеханической связи, старения (КЭМС, КС), температурный коэффициент частоты, модуля упругости, линейного расширения (ТКЧ, ТКМУ, ТКЛР) добротности волновода (ДВ) и др.

*Основные характеристики и параметры МУВ.* Выделим параметры и характеристики материалов МУВ, обуславливающие эксплуатационные и метрологические свойства МППД: физико-механические; электрические; магнитные. Параметры материалов МУВ, за исключением намагниченности насыщения  $J_s$  и точки Кюри, весьма чувствительны к химическому составу материала и наличию примесей. Поэтому с целью достижения экстремально высоких магнитоупругих свойств могут быть использованы различные виды плавок в индукционных печах в условиях вакуума.

Анализ показывает, что на параметры и характеристики МУВ значительное воздействие оказывают, как термодинамические факторы, текстура материала, действие механических и магнестрикционных напряжений, так и вид термо-механической обработки материалов [13–14].

Свойства магнестрикционных материалов, непосредственно вытекающие из особенностей МППД как целостной системы элементов, характеризуются рядом параметров, к которым относятся магнестрикционная постоянная  $a$ , магнестрикционная постоянная чувствительности  $\Lambda$ , коэффициент магнито-механической связи  $K_{\text{мм}}$  [9] и др.

Эффективность магнито-механических преобразований в значительной степени зависит и от электромагнитных и механических потерь энергии в ферромагнитных материалах. Электромагнитные потери  $P_{\text{эм}}$  составляют основную часть общих потерь. Они складываются из потерь на вихревые токи  $P_{\text{вт}}$ , которые зависят от удельного электрического сопротивления материала  $\rho$ , и потерь на магнитный гистерезис  $P_{\text{гм}}$ , которые косвенно могут быть оценены по коэрцитивной силе  $H_c$  материала. Эффективность материалов тем выше, чем большие значения  $a$ ,  $\Lambda$ ,  $K_{\text{мм}}$ , обратимости проницаемости  $\mu_r$  имеют материалы, и чем ниже их электромагнитные потери  $P_{\text{эм}}$  [9].

*Требования, предъявляемые к материалам МУВ.* С целью обеспечения высоких метрологических и эксплуатационных характеристик МППД как единой

системы взаимосвязанных элементов при высокой эффективности магнитомеханического преобразования к материалам МУВ установим следующие требования:

- точка Кюри  $T_c$  более  $+200^\circ\text{C}$ ;
- магнитострикция насыщения  $\lambda_s$  более  $50 \cdot 10^{-6}$ ;
- коэрцитивная сила  $H_c$  менее  $1,64 \text{ Э}$ ;
- модуль упругости  $E_{\text{му}}$  не менее  $19 \cdot 10^3 \text{ кг/мм}^2$ ;
- большое значение магнитной проницаемости  $\mu_{\text{max}}$  в малых и средних магнитных полях;
- низкий коэффициент затухания ультразвуковой волны  $\beta_{\text{кзв}}$ ;
- высокий коэффициент магнитомеханической связи  $K_{\text{ммс}}$ ;
- ТКЛР  $\alpha_L$  менее  $8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ;
- ТКЧ  $\alpha_f$  менее  $10 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ ;
- ТКМУ  $\alpha_E$  менее  $5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ );
- магнитострикционная постоянная  $a$  в диапазоне температур  $+20 \dots +300^\circ\text{C}$  должна составлять  $(11 - 13) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ;
- предел прочности  $\sigma_B$  не менее  $120 \text{ кг/мм}^2$ ;
- временное сопротивление  $\sigma_B$  в диапазоне  $900 - 1400 \text{ МПа}$ ;
- близко к нулевому значению коэрцитивная сила  $H_c$ ;
- высокая коррозионная стойкость при работе в агрессивных средах;
- высокая стабильность физико-механических и магнитных свойств в течение продолжительного времени.

*Факторы, влияющие на характеристики и параметры МУВ.* Как следует из анализа на характеристики и параметры материалов МУВ большое влияние оказывают как внутренние дестабилизирующие факторы (ВДФ), сформированные в результате нарушения технологии их изготовления, так и ВВВ различной физической природы. В таблицах 1 и 2 приведены результаты систематизации основных дестабилизирующих факторов, действующих на волновод. Отражено влияние ВДФ и ВВВ на физико-механические, магнитные и электрические характе-

ристики ферромагнитных материалов, а также на характеристики измерительных сигналов МППД. Введены способы устранения или ослабления указанных возмущающих воздействий.

Анализ показывает, что под воздействием ВДФ и ВВВ в магнитоотрицательных материалах протекает ряд явлений, приводящих к изменению их характеристик, которые в свою очередь изменяют параметры МППД. Указанные явления и параметры образуют следующую группу:

- коэффициенты КЭМС, ДВ, КС, ТКЧ, ТКЛР, ТКМУ волновода;
- дисперсия скорости (ДСВ) магнитоупругих волн в волноводе;
- модуль упругости (МУ), линейных размеров волновода (ЛРВ), поперечной геометрии волновода (ПГВ), провис магнитоупругого волновода (ПМУВ) структуры (САВ) и разрыв (РАВ) волновода;
- утрата магнитоотрицательных свойств (УМС) в волноводе;
- поглощение (ПВ) или отражение (ОВ) магнитоупругих волн;
- характеристика линейности (ХЛ) выходного сигнала преобразователя;
- рабочая зона обзора (РЗО), «мертвая зона» (МЗ), и т. п. на линейном участке волновода;
- параметры полезного измерительного сигнала (ППИС) – амплитуда, длительность, скорость нарастания и спада импульса на выходе линейного акустического осциллятора;
- образование в рабочем пространстве МУВ шумовых сигналов (ШС).

Таблица 1

*Перечень основных ВДФ, влияющих на характеристики ЦАВ*

Вид ВДФ	Влияние ВДФ	Мероприятия на устранение или уменьшение ВДФ
Неоднородная структура ЦАВ (неоднородная среда, резкое снижение свойств среды ее плотности и модуля упругости)	ДСВ, ППИС, ШС, МУ	Провести проверку ЦАВ на технологической установке [13, 14] и удалить бракованные участки волновода
Волнистая форма ЦАВ	ДСВ, ППИС, ШС, ХЛ	Провести термомеханическую обработку ЦАВ на технологической установке [13]

Неравномерное сечение по всей длине ЦАВ	ДСВ, ППИС, ШС, ХЛ	Провести проверку ЦАВ на технологической установке [14] и удалить бракованные участки волновода
Наличие микротрещин и наклепов	ДСВ, ППИС, ШС, МУ	Провести проверку ЦАВ на технологической установке [14] и удалить бракованные участки волновода
Остаточные внутренние механические напряжения	ДСВ, ППИС, ШС, МУ	Провести термомеханическую обработку и проверку ЦАВ на технологических установках [13, 14]
Акустический волновод большой протяженностью	ХЛ	Использовать центрирующие и адаптирующие системы [19]

Таблица 2

*Перечень основных ВВВ, влияющих на характеристики ЦАВ*

Вид ВВВ	Влияние ВВВ	Мероприятия на устранение или уменьшение ВВВ
Температура до критическая	ТКЧ, ТКЛР, ТКМУ, МУ, РЗО, ЛРВ, ПАВ, ХЛ	Использовать новые сплавы с низкими и регулируемые температурными характеристиками ТКЧ, ТКЛР, ТКМУ [2]
Температура критическая (точка Кюри)	ПМС	Использовать сплавы с более высокой температурой Кюри. Концы ЦАВ покрыть методом электроосаждения сплавом цинк-никель [3]. <i>Примечание:</i> на сегодняшний день известно, что для некоторых сплавов (пермендюр 49К2Ф) максимальная точка Кюри составляет + 980 °С [2]
Агрессивные среды	ПГВ, САВ, РАВ, ДСВ, ХЛ, ППИС, ШС, ПВ, ОВ	Поместить ЦАВ в герметичный корпус из материала стойкого к агрессивным средам [10–12]
Старение	ТКЧ, ТКЛР, ТКМУ, РЗО, МУ, ЛРВ, ПАВ, ХЛ	Проводить искусственное старение сплавов с применением специальной термомеханической обработки [13, 14]
Акустические (микрофонные) воздействия	ППИС, ХЛ, ШС	Использовать в конструкции преобразователя системы дискретных центрирующих демпферов [19]
Электромагнитные воздействия	ППИС, ШС	Использовать в конструкции преобразователя материалов с высокой магнитной проницаемостью [10]
Пространственное перемещение ЦАВ с линейными и угловыми скоростями и ускорениями	ППИС, ШС, ПАВ, ХЛ	Выполнить преобразователь согласно базовой структуре [19]
Механические (сжимающее, растягивающее, скручиваю-	ПВ, ОВ, МУВ, ЛРВ, САВ, РАВ,	Выполнить преобразователь согласно базовой структуре [19]

щее, ударное, вибрационное) воздействие	ППИС, ШС, ХЛ, РЗО, МЗ	
Электрические воздействия	ППИС, ШС, САВ	Использовать электроизоляционные материалы с высоким удельным сопротивлением [9]

Комплексные исследования МППД на базе системного, энергетического и причинно-следственного информационно-алгоритмического подходов показывают: создание нового поколения МППД требует поиска новых подходов, развития, совершенствования и разработки новых методов анализа и синтеза данного класса магнестрикционных преобразователей.

### *Список литературы*

1. Артемьев Э.А. Способ измерения уровня и массы жидких сред в резервуарах / Э.А. Артемьев, В.Н. Прошкин // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2010. – Т. 2. – С. 153–154.
2. Артемьев Э.А. Материалы для чувствительных элементов магнестрикционных преобразователей параметров движения / Э.А. Артемьев, В.Н. Прошкин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: 2012. – Т. 2. – С. 258.
3. Магомедова Э.А. Электроосаждение сплава цинк-никель из амминохлоридных и аминокислотных электролитов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.03 / Э.А. Магомедова. – Пенза, 2002. – 125 с.
4. Магомедова Э.А. Проектирование прецизионных помехоустойчивых импульсных усилителей токовых сигналов для магнестрикционных преобразователей / Э.А. Магомедова, М.А. Магомедова, В.Н. Прошкин // Молодой ученый. – 2011. – №10. – С. 43–45.
5. Магомедова Э.А. Формирователь импульсов тока возбуждения магнитоупругих волн в акустических волноводах магнестрикционных преобразователях / Э.А. Магомедова, М.А. Магомедова, В.Н. Прошкин // Молодой ученый. – 2011. – №10. – С. 45–48.

6. Прошин И.А. Совершенствование динамических стендов авиационных тренажеров на базе гидроприводов / И.А. Прошин, В.М. Тимаков, В.Н. Прошкин // Мехатроника, автоматизация, управление. – М., 2008. – №12. – С. 18–22.

7. Прошин И.А. Тренажер вертолета с имитацией посадки на взволнованную водную поверхность / И.А. Прошин, В.М. Тимаков, В.Н. Прошкин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – №9. – С. 65–69.

8. Прошин И.А. Тренажер плавающего объекта для обучения экипажей действиям в чрезвычайных ситуациях / И.А. Прошин, В.М. Тимаков, В.Н. Прошкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2009. – №1. – С. 82–87.

9. Прошкин В.Н. Конструкторско-технологические способы совершенствования магнитострикционных преобразователей линейных перемещений для специальных условий эксплуатации: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / В.Н. Прошкин. – Астрахань, 2007. – 229 с.

10. Прошкин В.Н. Магнитострикционные преобразователи линейных перемещений для специальных условий эксплуатации // Датчики и системы. – М., 2007. – №6. – С. 35–38.

11. Прошкин В.Н. Системный анализ магнитострикционных преобразователей параметров движений на крутильных магнитоупругих волнах для тренажеров транспортных средств / В.Н. Прошкин, И.А. Прошин, В.М. Тимаков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2008. – Т. 1. – С. 458–462.

12. Прошкин В.Н. Принципы построения преобразователей параметров движений для гидропривода тренажеров транспортных средств / В.Н. Прошкин, И.А. Прошин, В.М. Тимаков // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2010. – Т. I. – С. 272–275.

13. Прошкин В.Н. Способ термомеханической обработки ферромагнитных проволок для акустических волноводов / В.Н. Прошкин, Л.А. Прошкина // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2013. – Т. 2. – С. 180–181.

14. Прошкин В.Н. Способ проверки ферромагнитных проволок после их термомеханической обработки / В.Н. Прошкин, Л.А. Прошкина, Г.П. Разживина // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2013. – Т. 2. – С. 181–182.

15. Прошкин В.Н. Систематизация требований, предъявляемых к акусто-электрическим преобразователям магнитострикционных измерительных систем / В.Н. Прошкин, М.А. Магомедова, Л.А. Прошкина, Е.В. Трусов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2015. – Т. 2. – С. 40–42.

16. Прошкин В.Н. Систематизация требований, предъявляемых к демпферам акустического волновода магнитострикционных преобразователей параметров движений / В.Н. Прошкин, М.А. Магомедова, Л.А. Прошкина, Е.В. Трусов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2015. – Т. 2. – С. 42–44.

17. Прошкин В.Н. Многофункциональный преобразователь параметров движения гидропривода тренажера транспортных средств / В.Н. Прошкин, И.А. Прошин, Л.А. Прошкина, Э.А. Магомедова, М.А. Магомедова // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: Материалы XIII Международной научно-практической конференции. – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 104 – 110.

18. Прошкин В.Н. Автоматизированная система для сертификационных испытаний динамических стендов тренажеров транспортных средств / В.Н. Прошкин, Л.А. Прошкина, Э.А. Магомедова, М.А. Магомедова // Проблемы и перспективы современной науки: Материалы X Международной научно-практической конференции. – Ставрополь: Логос, 2016. – С. 87–93.

19. Прошкин В.Н. Способы уменьшения влияния внешних ударных и вибрационных воздействий на чувствительный элемент магнитострикционного преобразователя параметров движения / В.Н. Прошкин, Л.А. Прошкина, Э.А. Магомедова, М.А. Магомедова // Научная дискуссия: вопросы технических наук: Сб. ст. по материалам XLIV междунар. науч.-практ. конф. – №3 (33). – М.: Интернаука, 2016. – С. 13–19.

20. Прошкина Л.А. Совершенствование управления предприятиями авиационного тренажеростроения в условиях модернизации экономики: Дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Л.А. Прошкина. – Пенза, 2006. – 178 с.

21. Прошкина Л.А. Подходы к обеспечению конкурентоспособности предприятия / Л.А. Прошкина, С.В. Афанасьев // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2009. – Т. 2. – С. 428–431.

22. Прошкина Л.А. Разработка концептуальной схемы обеспечения конкурентоспособного функционирования предприятий тренажеростроения // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2008. – Т. 1. – С. 453.

23. Прошкина Л.А. Совершенствование управления предприятиями авиационного тренажеростроения в условиях модернизации экономики: монография / Л.А. Прошкина; под ред. Л.И. Крутовой. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. – 156 с.

24. Прошкина Л.А. Повышение качества и конкурентоспособности авиационных тренажеров на основе модернизации // Труды международного симпозиума «Надежность и качество» / Л.А. Прошкина, В.Н. Прошкин. – Пенза, 2013. – Т. 2. – С. 262–264.