

На правах рукописи

НИКОЛАЕВ АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА, НАГРУЖЕННОГО НА
МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары 2010

Работа выполнена на кафедре промышленной электроники в ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Славутский Леонид Анатольевич, ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Рогинская Любовь Эммануиловна, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа,

кандидат технических наук, доцент Ильин Владимир Федорович, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары.

Ведущая организация: ООО «ЧЭАЗ - ЭЛПРИ», г. Чебоксары.

Защита состоится 23 апреля 2010 года в 16:00 на заседании диссертационного совета Д212.301.02 при ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», по адресу 428015, г. Чебоксары, пр. Московский, 15, аудитория В-310.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим выслать по адресу: 428015, г. Чебоксары, пр. Московский, 15 на имя ученого секретаря.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, с авторефератом – на сайте ЧГУ: <http://www.chuvsu.ru>.

Автореферат диссертации разослан «___» марта 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Г.П. Охоткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Инверторы ультразвуковой частоты предназначены для преобразования тока промышленной частоты в ток высокой частоты, питающий электроакустические преобразователи, и широко применяются в промышленности для решения таких задач, как ультразвуковая сварка, очистка, интенсификация технологических процессов, борьба с накипными отложениями и др.

При разработке и проектировании инверторов, работающих на магнитострикционную нагрузку, решается ряд типовых задач, являющихся, в том числе и **основными задачами** настоящего исследования:

1. Исследование режимов работы последовательного резонансного инвертора с магнитострикционной нагрузкой и разработка математической модели.
2. Разработка методики измерения колебаний в нагрузке для получения сигнала обратной связи для системы управления инвертором.
3. Разработка контура управления инвертором по экстремальному значению амплитуды колебаний в нагрузке. Исследование динамических свойств инвертора с замкнутой системой управления.
4. Экспериментальное изучение влияния на работу инвертора изменений параметров нагрузки, а также исследование механизмов и средств интеграции инвертора в системы телемеханики.

В некоторых выпускаемых промышленностью серийных инверторах ультразвуковой частоты, работающих на магнитострикционную нагрузку, рассматриваемые задачи решены недостаточно. Это часто не позволяет получить ожидаемого результата и дискредитирует ультразвуковые технологические методы в целом. Необходимость дальнейшего исследования инверторов данного типа для эффективного решения поставленных задач определяет **актуальность** диссертационной работы.

Объектом исследования являются полупроводниковые преобразователи ультразвуковой частоты, нагруженные на магнитострикционный преобразователь (МП).

Предметом исследования являются режимы работы автономного последовательного резонансного тиристорного инвертора ультразвуковой частоты с магнитострикционной нагрузкой и системой управления с датчиком прямой бесконтактной акустической обратной связи.

Целью работы является исследование и разработка последовательного резонансного инвертора с бесконтактной акустической обратной связью, работающего на магнитострикционную нагрузку.

Методы исследования базируются на общих положениях теории цепей, теории дифференциальных и алгебраических уравнений, вычислительных методах и использовании современных инструментальных систем моделирования. Также при решении поставленных задач использовались цифровая обработка сигналов, теория автоматического управления и теория измерений.

Экспериментальные исследования проводились при помощи современных цифровых средств измерения. При обработке результатов экспериментальных и

теоретических исследований широко применялось современное программное обеспечение.

Достоверность полученных результатов определяется адекватностью выбранных моделей и согласием результатов математического моделирования, имитационного моделирования и экспериментальных измерений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Математическая и имитационная модели автономного последовательного резонансного тиристорного инвертора с магнитострикционной нагрузкой и замкнутой системой управления.
2. Методика прямого бесконтактного получения сигнала обратной связи для системы автоматического акустического согласования инвертора с нагрузкой.
3. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие адекватность выдвинутых теоретических положений.

Научная новизна работы определяется следующими положениями:

1. Разработанная математическая модель отличается от известных тем, что автономный последовательный резонансный тиристорный инвертор выполнен по двухтактной схеме, а магнитострикционная нагрузка имеет две согласно включенные обмотки при отсутствии отдельного подмагничивающего контура.
2. Предложенная методика прямого бесконтактного измерения амплитуды колебаний в нагрузке, основанная на доплеровской модуляции ультразвукового поля и ранее не описываемая в литературе, позволяет получить сигнал обратной связи для системы автоматического акустического согласования инвертора с нагрузкой.
3. Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты моделирования и показывают адекватность новых теоретических положений.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Математические и имитационные модели позволяют упростить и ускорить проектирование тиристорных автономных последовательных резонансных инверторов с магнитострикционной нагрузкой.
2. Предложенная методика прямого бесконтактного измерения амплитуды колебаний в нагрузке позволяет повысить точность по сравнению с косвенными электрическими методами и надежность по сравнению с контактными механическими методами.
3. Полученные экспериментальные и теоретические данные позволяют повысить амплитуду колебаний в нагрузке.

Реализация результатов работы. Результаты работы нашли применение при модернизации инверторов ультразвуковой частоты серии USP компании ООО «ВНИИР-Промэлектро» и при разработке магнитострикционных преобразователей ПМД-2 компании ЗАО «ЭЙМ-ДИФЕРАЛЬ», что подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на V, VI, VIII Всероссийских научных конференциях «Динамика нелинейных и дискретных систем», г. Чебоксары, 2003, 2005, 2009 г.; VI Всероссийской научной конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», г. Чебоксары, 2006 г.; Всероссийской научной конференции посвя-

щенной 75-летию КГТУ им. А.Н. Туполева «Информационные технологии в науке, образовании и производстве», г. Казань, 2007 г.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 15 научных работ, из них 5 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Задачи предпринятого исследования обусловили композицию работы, которая состоит из введения, четырех глав и заключения. К работе прилагается список использованной литературы, насчитывающий 104 наименования, и представлены приложения на 2-х страницах. Диссертационное исследование изложено на 147 страницах машинописного текста, содержит 2 таблицы и 87 рисунков. Основные результаты работы получены автором лично.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность задачи построения математической модели силовой цепи инвертора, разработки новых методов измерения амплитуды механических колебаний в нагрузке, а также создания системы автоматического акустического согласования инвертора с нагрузкой; сформулированы цели и задачи работы, ее основные положения.

В первой главе «**Особенности работы резонансных полупроводниковых преобразователей ультразвуковой частоты с магнитострикционной нагрузкой**» рассмотрена работа полупроводниковых преобразователей на магнитострикционную нагрузку.

Показаны специфика и течение технологических процессов, во многом определяющие требования к преобразователю в целом. Представлены схема замещения магнитострикционной нагрузки с электромеханическим трансформатором и схема, приведенная к первичной обмотке, позволяющие связать акустические и электрические параметры. Показано, что работа инвертора в режиме импульсной модуляции (рис. 1) ультразвукового поля позволяет повысить активность течения технологических процессов. Приведены типовые значения параметров, определяющих оптимальный режим импульсной модуляции.

Рассмотрены основные схемы построения и временные диаграммы работы полупроводниковых автономных резонансных инверторов ультразвуковой частоты, работающих на магнитострикционную нагрузку. Показано, что дополнительная по-

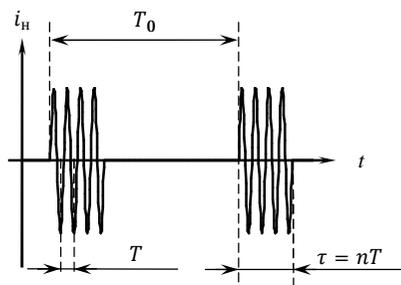


Рис. 1. Импульсная модуляция работы инвертора: T_0 - период следования рабочих циклов инвертора; τ - длительность активной фазы рабочего цикла; T - период работы инвертора; n - количества периодов возбуждения нагрузки за рабочий цикл

ляризация сердечника магнитострикционного преобразователя является необходимым фактором увеличения амплитуды колебаний в нагрузке.

Отмечено, что акустическое согласование инвертора с нагрузкой является одной из наиболее важных и актуальных задач, решаемых при разработке инвертора. Критерием оптимального согласования является равенство частоты механического резонанса нагрузки и частоты её возбуждения инвертором, сопровождающееся максимальной амплитудой колебаний в нагрузке.

Рассмотрены две получивших распространение группы методов получения информации о степени акустического согласования: прямых методов измерения амплитуды колебаний в нагрузке на механической стороне и косвенных методов определения механического резонанса путем контроля параметров электрических сигналов в силовых цепях питания нагрузки.

Во второй главе «**Разработка модели и исследование режимов работы инвертора с магнитострикционной нагрузкой**» проведено исследование схемы двухтактного автономного последовательного резонансного тиристорного инвертора (рис. 2) и разработана её математическая модель.

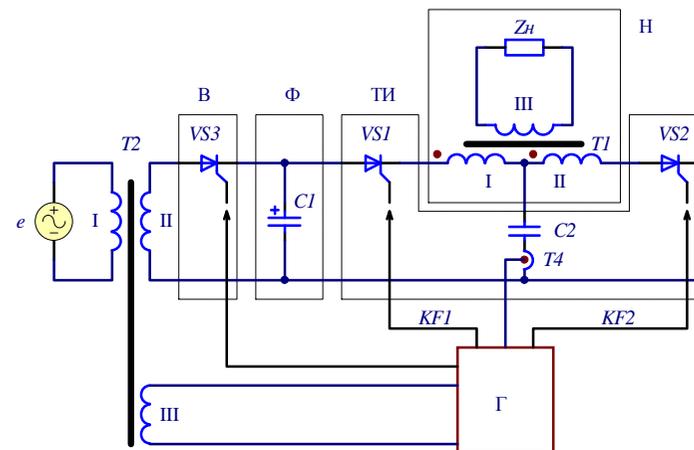


Рис. 2. Структурная схема инвертора: e - источник сетевого напряжения; $T2$ - трансформатор гальванической изоляции от сети; B - управляемый выпрямитель; Φ - фильтр; $C1$ - энергонакопительная емкость; $ТИ$ - инвертор; $VS1$ и $VS2$ - силовые ключи (RC-цепи защиты от перенапряжений не показаны); $T4$ - датчик тока; $C2$ - коммутационная емкость; H - нагрузка; $T1$ - электромеханический трансформатор; Z_n - сопротивление нагрузки МП; Γ - генератор управляющих импульсов

Схема характеризуется простотой и не требует введения дополнительного подмагничивающего контура. Отличительной особенностью данной схемы является наличие двух согласованных включенных рабочих обмоток (I и II) магнитострикционного преобразователя (МП). Следовательно, изменения полярности магнитной индукции в сердечнике МП не происходит, что вызывает наличие постоянной составляющей магнитного потока. Получаемый в результате эффект эквивалентен введению подмагничивания и позволяет отказаться от использования дополнительного подмагни-

чивающего контура, что невозможно при использовании известных полумостовых и мостовых схем. Также в данной схеме реализуется удвоение частоты без применения трансформатора, что допускает её использование на частотах до 20 кГц.

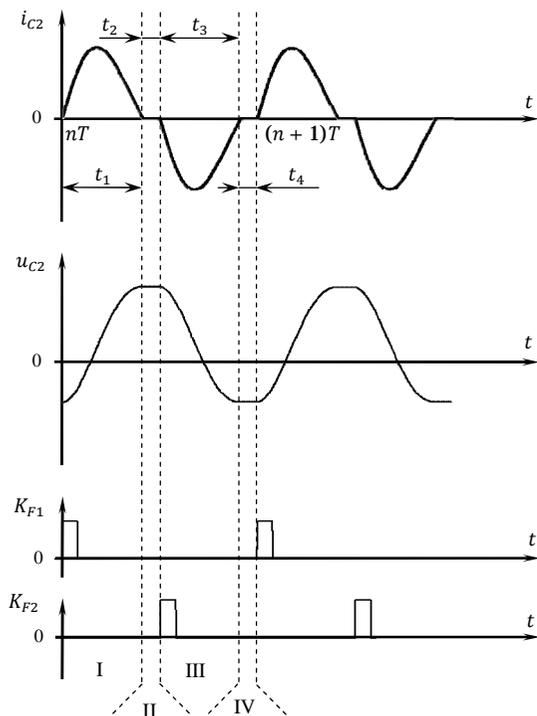


Рис. 3. Временные диаграммы работы инвертора: I, II, III, IV – интервалы непрерывности работы; i_{c2} – ток в коммутирующей емкости C_2 ; K_{F1} и K_{F2} – коммутационные функции

Определение параметров эквивалентной схемы замещения магнитострикционной нагрузки проводилось методом круговых диаграмм тока (проводимости). Инвертор относится к системам с переменными параметрами, и на активной части рабочего цикла $\tau = nT$ его рабочий период разбивается на четыре интервала непрерывности (рис. 3). Границы определяются соответствующими поверхностями сшивания:

- I) при $nT < t < nT + t_1$ (тиристор $VS1$ включен, а $VS2$ отключен);
- II) при $nT + t_1 < t < nT + t_2$ (тиристор $VS1$ уже отключился, а $VS2$ еще не включился);
- III) при $nT + t_2 < t < nT + t_3$ (тиристор $VS1$ отключен, а $VS2$ включен);
- IV) при $nT + t_3 < t < (n+1)T$ (тиристоры $VS1$ и $VS2$ отключены).

На каждом интервале непрерывности анализ работы силовой части преобразователя сводится к рассмотрению процессов в линейной непрерывной части. Для расчета использовался метод переменных состояния. Полученные по методу переменных состояния системы уравнений решались численно-аналитическим методом расчета переходных процессов в цепи с периодическими коммутациями (методом припасовывания). Решение на интервалах I и III дополнялись процедурами для точного поиска положения границ t_1 и t_3 участков непрерывности по методу Ньютона.

Окончательно динамическая модель представлена разностным уравнением

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_\Phi((n+1)T) = & \\ = & \Phi^4(t_4 - t_3)\Phi^3(t_3 - t_2)\Phi^2(t_2 - t_1)\Phi^1(t_1)\mathbf{X}_\Phi(nT) \\ + & \Phi^4(t_4 - t_3)\Phi^3(t_3 - t_2)\Phi^2(t_2 - t_1)\mathbf{B}_\Phi^1(t_1)\mathbf{V}_\Phi(nT), \end{aligned}$$

где \mathbf{X}_Φ – вектор состояния, Φ^i – переходная матрица линейной непрерывной части; \mathbf{B}_Φ^i – матрица, учитывающая влияние вектора внешних воздействий \mathbf{V}_Φ , $i=1..4$ – номер интервала непрерывности.

Нахождение элементов матриц Φ^i и \mathbf{B}_Φ^i , расчеты переходных и установившихся режимов проводились в системе компьютерной математики Maple компании Waterloo Maple Inc.

В результате моделирования были получены качественные и количественные оценки характера и параметров переходных и установившихся режимов работы инвертора, энергетические характеристики, а также коэффициент полезного действия. На основе сравнения полученных результатов с результатами расчета имитационной модели, выполненной в среде MATLAB/Simulink, показана адекватность модели.

Показано изменение деформации $\Delta l/l$ во времени в зависимости от тока в рабочих обмотках МП при его возбуждении инвертором, выполненным по исследуемой схеме (рис. 4). Здесь i_{VS} – ток в первой (сплошная) и второй (пунктирная) рабочих обмотках, B_s – вершина предельной петли гистерезиса. Рабочие обмотки МП включены согласно, и перемагничивание сердечника не происходит. Работа осуществляется на одной половине характеристики намагничивания сердечника. За счет наличия петли гистерезиса в материале присутствует остаточная индукция B_r . Это позволяет вывести рабочую точку на линейный участок зависимости удельной деформации $\Delta l/l$ от магнитной индукции B .

В реальных условиях эксплуатации нагрузка инвертора имеет несколько частот механического резонанса, что обусловлено наличием большого количества отражающих поверхностей и сложной формой технологического оборудования. Для получения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) механических колебаний в нагрузке, выражающей зависимость амплитуды колебаний от частоты работы инвертора (рис. 5), произведено имитационное моделирование сложного резонанса в нагрузке с двумя собственными частотами.

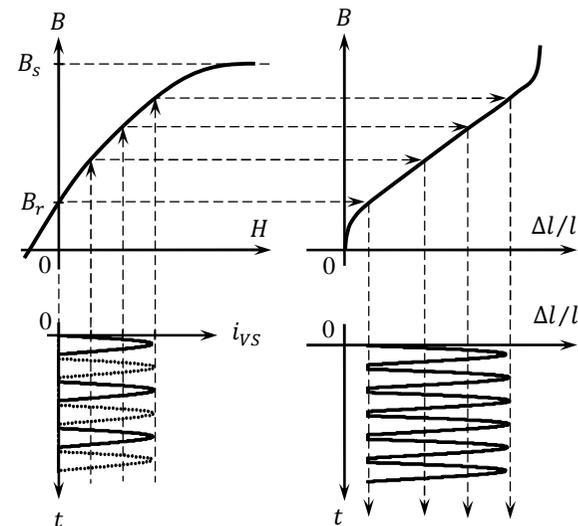


Рис. 4. Изменение деформации во времени в зависимости от тока в рабочих обмотках МП

Резонансный характер зависимости амплитуды колебаний в нагрузке накладывает определенные ограничения на частоту работы инвертора. В то же время сигналы в электрических цепях резонансной характеристикой не обладают.

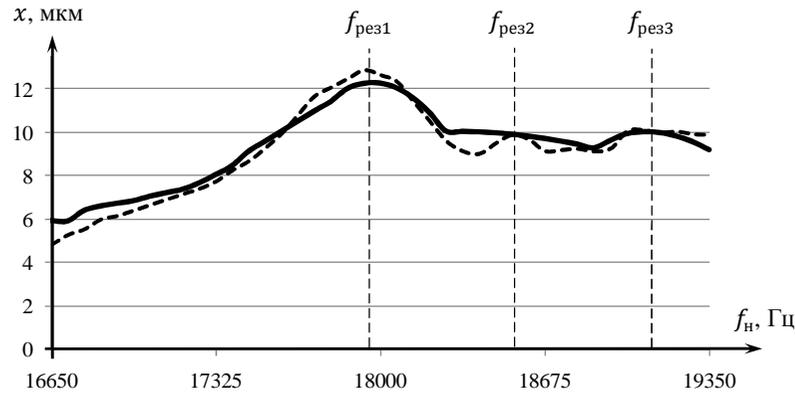


Рис. 5. Расчетная (сплошная) и экспериментальная (пунктирная) зависимости амплитуды механических колебаний в нагрузке от их частоты для случая сложного резонанса

В общем случае существует несколько локальных максимумов на АЧХ (на частотах $f_{рез1}$, $f_{рез2}$ и $f_{рез3}$), положение и амплитуда которых определяется параметрами нагрузки. В то же время в процессе работы из-за наличия дестабилизирующих факторов параметры нагрузки подвержены изменениям. Это обуславливает дрейф положения и амплитуды пиков АЧХ, что приводит к необходимости введения системы экстремального регулирования амплитуды колебаний в нагрузке.

В главе исследуются также аварийные режимы работы инвертора, связанные с замыканиями в цепи нагрузки и опрокидыванием инвертора. По результатам исследования определены необходимые предельные параметры тиристоров, исключающие выход их из строя при возникновении аварийных ситуаций.

В третьей главе «Разработка системы управления инвертором, обеспечивающей акустическое согласование с нагрузкой» показана возможность и дано математическое описание задачи получения амплитуды колебаний в нагрузке на основе доплеровской модуляции ультразвукового сигнала для использования в качестве сигнала обратной связи системы автоматического акустического согласования. При этом измерение является прямым и бесконтактным, что позволяет увеличить точность и надежность измерения. Схема измерения амплитуды колебаний в нагрузке прямым бесконтактным акустическим методом и структурная схема измерителя-преобразователя ИП, реализующего указанную методику, представлена на рис. 6. Установка ультразвуковых приемо-передатчиков осуществляется на МП в месте, соответствующем узлу стоячей волны. Методика определения положения данного узла приводится далее.

Физическая основа метода заключается в зондировании поверхности нагрузки ультразвуковой волной и приеме отраженной волны с измененной вследствие про-

явления эффекта Доплера частотой. Изменение частоты пропорционально мгновенной скорости колебаний.

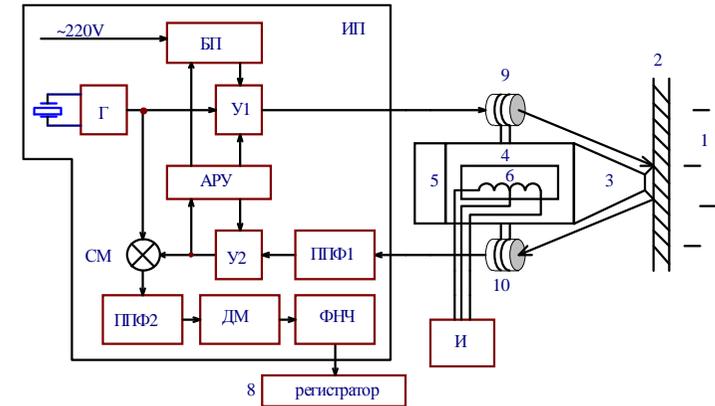


Рис. 6. Схема измерения амплитуды колебаний в нагрузке прямым бесконтактным акустическим методом: 1 – обрабатываемая среда; 2 – стенка технологического оборудования; 3 – концентратор МП; 4 – сердечник МП; 5 – демпфер; 6 – рабочие обмотки МП; 8 – регистратор; И – инвертор; 9 – ультразвуковой излучатель; 10 – ультразвуковой приемник; ИП – измеритель-преобразователь

Спектральные характеристики отраженной волны приведены на рис. 7,а. Спектральная плотность имеет форму, соответствующую частотно-модулированному сигналу. Симметричные относительно несущей частоты зондирующего сигнала ω_0 максимумы возникают на частотах, кратных частоте колебаний в нагрузке Ω . Их высота определяется глубиной модуляции $2\omega_0 \cos \theta V(t)/c$ и описывается модифицированной функцией Бесселя.

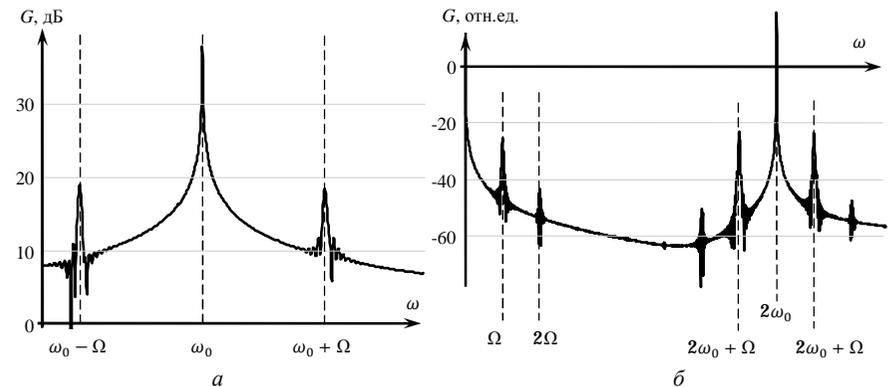


Рис. 7. Спектральная плотность отраженной волны (а) и сигнала после смесителя (б)

Принятый сигнал подвергается прямому преобразованию частоты через смешение с опорным сигналом. На рис. 7,б показана спектральная плотность сигнала

после смесителя, в которой присутствуют сигналы на суммарной и разностных частотах. Практическое значение имеет низкочастотная область спектра. Ее выделение фильтрацией и последующее детектирование позволяют получить огибающую скорости колебания исследуемого объекта. Между скоростью и амплитудой колебаний имеется однозначная зависимость, и переход к амплитуде трудностей не вызывает.

Относительная эффективность возбуждения инвертором колебаний в нагрузке, определяемая максимальной амплитудой колебаний в нагрузке за рабочий цикл T_0 , на двух разных частотах определяется как

$$X_{\max}(\Omega_1)/X_{\max}(\Omega_2) = \frac{\max_{t=0\dots T_0} \int V(t, \Omega_1) dt}{\max_{t=0\dots T_0} \int V(t, \Omega_2) dt}.$$

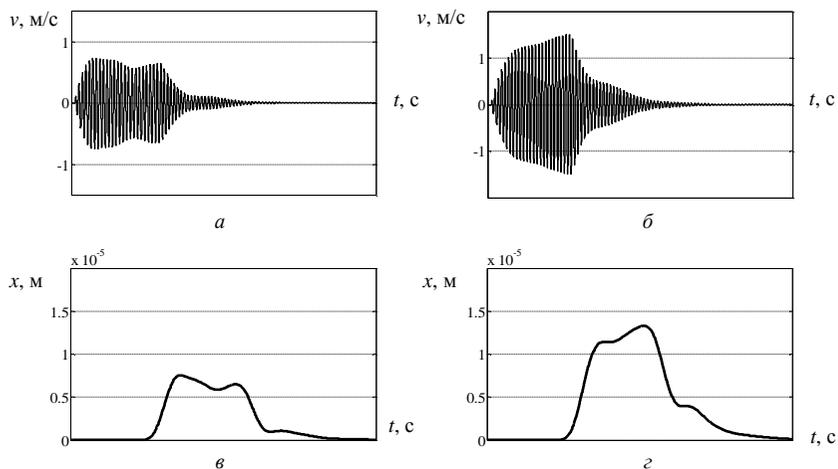


Рис. 8. Скорость колебаний поверхности нагрузки (*a* и *b*) и огибающая амплитуды колебаний (*v* и *z*), полученная приведенным методом, при возбуждении нагрузки на частоте ее резонанса (*b* и *z*) и при наличии частотной расстройки (*a* и *v*)

На рис. 8 представлены скорость колебаний поверхности нагрузки (*a* и *b*) и огибающая амплитуды колебаний (*v* и *z*), полученная приведенным методом, при возбуждении нагрузки на частоте ее резонанса (*b* и *z*) и вдали от нее (*a* и *v*). Из сравнения зависимостей видно, что метод позволяет выделять огибающую амплитуды колебаний поверхности нагрузки. Таким образом, предложенная методика может быть использована для получения сигнала обратной связи для системы автоматического акустического согласования инвертора с нагрузкой.

Также рассмотрены некоторые аспекты практического применения ультразвуковых доплеровских устройств, связанные с необходимостью учета свойств среды распространения акустических волн.

В силу постоянных и недетерминированных изменений параметров нагрузки инвертора, в условиях непостоянства параметров обрабатываемых технологических сред (давление в бойлере, температура и масса теплоносителя и т.д.) и наличия других дестабилизирующих факторов, необходимо осуществление автоматического по-

иска оптимальных условий акустического согласования, что определяет применение систем экстремального регулирования, поддерживающих максимальное значение регулируемой величины. Структурная схема инвертора с замкнутой системой экстремального регулирования (СЭР) приведена на рис. 9.

В связи с наличием нескольких локальных максимумов на статической характеристике объекта система должна реализовать два вида поисковых движений: пробное – для определения окрестности глобального максимума, и рабочее – для точного поиска экстремума и последующего его поддержания при дрейфе статической характеристики.

Был выбран экстремальный регулятор шагового типа, достаточно подробно описанный в литературе и получена система разностных уравнений, описывающая динамику системы. В результате исследования определены параметры, характеризующие быстродействие, качество регулирования и устойчивость системы.

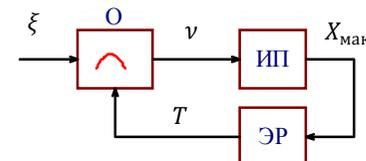


Рис. 9. Общая структурная схема СЭР: ИП – измеритель-преобразователь; ЭР – экстремальный регулятор; O – объект управления; ξ - случайные внешние воздействия на объект; v – скорость колебаний поверхности объекта; X_{\max} – максимальная амплитуда колебаний в нагрузке за рабочий период T_0 ; T – период работы инвертора

Быстродействие системы определяется шагами пробного $\Delta T_{п,д}$ и рабочего $\Delta T_{р,д}$ движений. При уменьшении величины шага $\Delta T_{п,д}$ менее 0,5 мкс время пробного движения начинает значительно возрастать. С другой стороны, для гарантированного попадания начальной точки рабочего движения в окрестность глобального максимума необходимо выполнение условия $\Delta T_{п,д} < 0,83$ мкс. Также при уменьшении величины рабочего шага $\Delta T_{р,д}$ менее 0,05 мкс наблюдается значительное увеличение времени выхода на экстремум. При значениях временных шагов $\Delta T_{п,д} = 0,5$ мкс и $\Delta T_{р,д} = 0,05$ мкс максимальное общее количество поисковых шагов составит $n_d = 21$. Время поискового движения до установления автоколебаний - $t_d = n_d T_0 = 1,26$ с.

Амплитуда и частота автоколебаний определяют качество регулирования экстремального регулятора. Для исследуемой системы параметры автоколебаний определяются значениями рабочего шага и смещения δ точки переключения релейного элемента в сигнум-реле регулятора. Статическая характеристика объекта в окрестности точки экстремума имеет вид резонансной кривой, характеризующейся максимальной амплитудой колебаний $X_{рез}$, резонансным периодом колебаний $T_{рез}$ и добротностью колебаний Q . Данные параметры в процессе работы инвертора подвержены изменениям. В процессе эксплуатации установлены значения добротности $Q = 20 \div 30$ при $X_{рез} = 10 \div 15$ мкм и $T_{рез} = 9$ кГц $\pm 7,5\%$ для типовых нагрузок инвертора. На основе этих эмпирических данных были получены приближенные оценки параметров автоколебаний. Так, при указанных параметрах резонансной кривой, величине шага рабочего движения $\Delta T_{р,д} = 0,05$ мкс и $\delta = 0,1$ мкм соответствует величина

максимального отклонения регулируемой величины от экстремального значения 0,336 мкм. Потери на «рыскание», характеризующие падение эффективности работы инвертора вследствие поисковых движений, составляют $X_{п}=0,114$ мкм. Данное значение потерь удовлетворяет требованиям, предъявляемым к устройствам интенсификации технологических процессов.

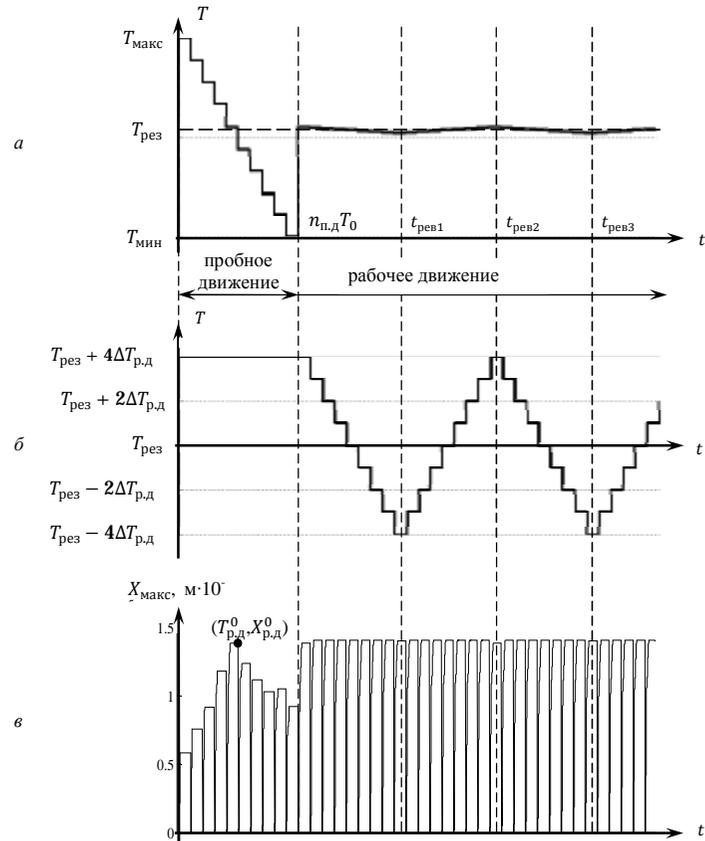


Рис. 10. Временная зависимость выходного сигнала регулятора T (а) и регулируемого параметра X_{\max} (б) при движении системы к экстремуму, автоколебания вокруг точки экстремума (в)

Вопросы обеспечения устойчивости экстремальных регуляторов шагового типа с неинерционными объектами управления достаточно подробно рассмотрены в литературе. Все приведенные в исследованиях результаты с успехом могут быть использованы и для обеспечения устойчивости разрабатываемой системы. Особенностью разрабатываемой системы является наличие нескольких локальных максимумов на статической характеристике объекта. В случае значительного изменения параметров нагрузки инвертора возможно появление иного глобального максимума на

статической характеристике. Для обеспечения работоспособности системы в данном случае необходимо введение элемента, реализующего пробное движение через определенные промежутки времени, зависящие от характера нагрузки.

Графически движение СЭР к экстремуму и режим периодических колебаний вокруг экстремума показаны на рис. 10. Зависимости получены при виде статической характеристики объекта, приведенном на рис. 5.

В четвертой главе «**Экспериментальное исследование работы инвертора**» для проверки теоретических положений, изложенных в предыдущих главах диссертации, проведено экспериментальное исследование работы инвертора. Приведена схема экспериментальной установки (рис. 11) и перечень использовавшихся контрольно-измерительных средств.

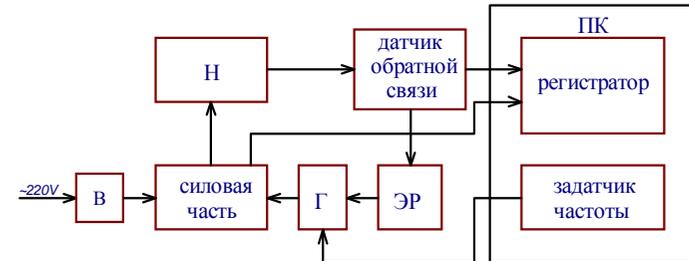


Рис. 11. Структурная схема экспериментальной установки: ПК – персональный компьютер; Н – нагрузка; датчик Г – задающий генератор; ЭР – экстремальный регулятор; В - выпрямитель

Измерения проводились при работе установки в импульсно-модулированном режиме при величине периода рабочего цикла $T_0=60$ мс и длительности активной фазы рабочего цикла $\tau = nT$, где $n=12$ - количество периодов работы инвертора за рабочий цикл.

В результате были получены осциллограммы электрических величин в силовых цепях инвертора. На основе сравнения полученных результатов с результатами математического моделирования показана адекватность разработанной модели в пределах сделанных допущений.

Экспериментальные исследования амплитуды колебаний в нагрузке, возбуждаемой инвертором, проводились по следующим схемам и методикам:

- 1) измерение амплитуды ультразвуковых колебаний в технологической среде пьезоэлектрическим акселерометром;
- 2) измерение амплитуды колебаний рабочего конца МП пьезоэлектрическим акселерометром в режиме холостого хода;
- 3) измерение амплитуды колебаний поверхности технологического оборудования контактным пьезоэлектрическим акселерометром;
- 4) измерение амплитуды колебаний в нагрузке прямым бесконтактным акустическим методом;
- 5) исследование выхода системы на экстремальное значение амплитуды колебаний поверхности технологического оборудования.

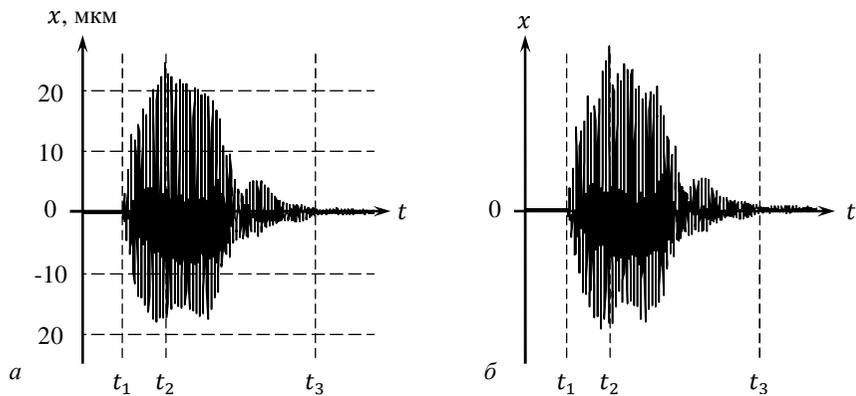


Рис. 12. Осциллограммы амплитуды колебаний поверхности технологического оборудования при проведении по схемам №3 (а) и №4 (б)

На рис. 12 приведены результаты измерения амплитуды колебаний в нагрузке в течении одного рабочего цикла по схемам №3 и №4. Зависимости качественно повторяют друг друга, что служит практическим доказательством применимости прямого бесконтактного акустического метода измерения вибраций для построения датчика обратной связи системы экстремального управления инвертором.

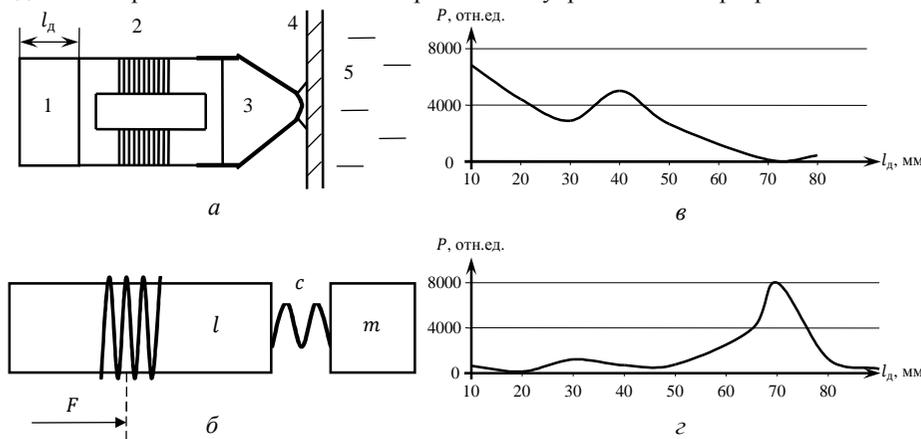


Рис. 13. Конструкция МП (а), упрощенная модель системы «МП-нагрузка» (б) и экспериментальные зависимости выходной акустической мощности в зависимости от длины демпфера при работе МП на холостом ходу (в) и на нагрузке (г)

Полученные экспериментальные результаты измерения амплитуды колебаний в нагрузке при выходе системы на экстремум также хорошо согласуются с результатами имитационного моделирования (рис. 10), что свидетельствует о возможности

практического применения разработанной системы экстремального регулирования амплитуды колебаний в нагрузке.

На рис. 13,а приведена конструкция МП, состоящего из демпфера (1) длиной l_d , двухстержневого магнитопровода в виде пакета из тонких пластин магнитоотрицательного материала, на котором размещена обмотка (2) для возбуждения в нем переменного высокочастотного поля, и концентратора (3), выполняющего функцию механического трансформатора скорости. Демпфер на свободном конце преобразователя обеспечивает механическое согласование МП с нагрузкой (4) и при определенных размерах позволяет осуществлять эффективное введение колебаний в технологическую среду (5).

Экспериментальные зависимости выходной акустической мощности в зависимости от длины демпфера при работе МП на холостом ходу и на нагрузке приведены на рис. 13,в и рис. 13,г.

Определение оптимальной длины демпфера возможно при помощи упрощенной модели системы «МП - нагрузка» (рис. 13,б), представляющей собой стержень длиной l с сосредоточенной нагрузкой массой m и упругостью c . Распределение колебательной скорости U по длине стержня описывается выражением

$$U = A \cos\left(\frac{\omega_n}{v} x\right) + B \sin\left(\frac{\omega_n}{v} x\right),$$

где ω_n - собственные циклические частоты колебаний, v - скорость распространения звука в стержне. Также по данному уравнению производится определение положения узла стоячей волны. Амплитуды A и B определяются граничными и начальными условиями - нагрузкой и фактором силы F , прилагаемой в области обмоток. Нахождение собственных частот ω_n осуществляется решением трансцендентного уравнения

$$\tan\left(\frac{\omega_n}{v} x\right) = \frac{mv}{ES(m\omega_n^2/c - 1)/v},$$

где E - модуль упругости, S - площадь сечения стержня. Его решение в графическом виде показано на рис. 14,а.

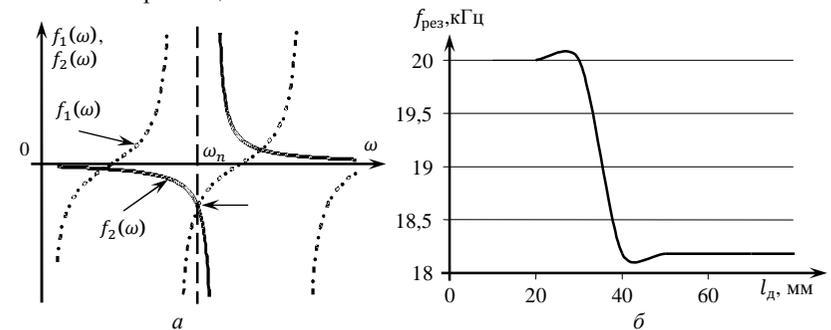


Рис. 14. Графическое решение уравнения для собственных частот колебаний МП (а) и зависимости основной резонансной частоты МП от длины демпфера (б)

Зависимость $f_2(\omega) = 0$ соответствует колебаниям МП на холостом ходу (без нагрузки), когда резонансные частоты кратны ($\omega_2 = 2\omega_1$ и т.д.). Изменение сосре-

доточенной массы m и упругости c приводит к смещению резонансных частот. Такая модель вполне адекватно качественно описывает изменение механических характеристик МП при изменении нагрузки.

На рис. 14,б показаны экспериментальные зависимости основной резонансной частоты от длины демпфера МП. Резкое изменение резонансной частоты на холостом ходу соответствует длине демпфера порядка 40 мм, что совпадает с максимальной амплитудой колебаний. В модельных расчетах это соответствует переходу с одной ветви на другую в решении трансцендентного уравнения, показанному стрелкой на рис. 14,а. Такой переход имеет место при равенстве нулю знаменателя в правой части уравнения, т.е. при $\omega = \sqrt{c/m}$. Если рассматривать демпфер как нагрузку к МП, то указанная частота соответствует его резонансным колебаниям, т.е. минимальной реактивной нагрузке на преобразователь.

Экспериментальные измерения зависимости частотных характеристик МП от длины демпфера позволяют при помощи представленной ранее модели произвести расчет необходимых размеров демпфера для обеспечения механического согласования МП с нагрузкой. Это повышает добротность колебательной системы и увеличивает амплитуду колебаний в нагрузке.

Течение технологических процессов определяет необходимость изменения режимов работы инвертора в процессе эксплуатации. Это вызывает необходимость интеграции инвертора в системы, в том числе беспроводные, управления технологической установкой. Для необходимости учета возникающих при этом особенностей в рамках диссертационного исследования был проведен ряд экспериментов: изучение изменчивости уровня радиосигнала в зависимости от поляризации излучения (взаимного расположения приемо-передающих штырьковых антенн) и наличия препятствий на пути распространения радиоволн, исследование зависимости уровня радиосигнала от геометрических размеров непроводящего окна проводящей оболочки.

В результате были получены гистограммы изменчивости уровней сигналов, теоретическая и экспериментальная функции ослабления и корреляционные функции сигналов. Анализ полученных результатов позволил сформулировать решение ряда проблем, связанных с распространением электромагнитных волн дециметрового диапазона, возникающих при разработке механизмов и средств интеграции инвертора в беспроводные системы телемеханики.

В окончании главы приведено краткое описание инверторов ультразвуковой частоты серии USP, при модернизации которых были использованы результаты данного диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования получены следующие результаты и сформулированы основные выводы:

1. В результате рассмотрения основных схем построения полупроводниковых автономных резонансных инверторов ультразвуковой частоты, работающих на магнитострикционную нагрузку, показано, что эффективность возбуждения инвертором нагрузки существенно зависит от выполнения условий их акустического согласо-

вания и введения дополнительного подмагничивания рабочего сердечника магнитострикционного преобразователя.

2. Разработана математическая модель двухтактного автономного последовательного резонансного тиристорного инвертора без отдельного подмагничивающего контура с двумя рабочими обмотками МП, позволяющая получать качественные и количественные оценки характера и параметров переходных и установившихся режимов работы инвертора.

3. Предложена новая методика прямого бесконтактного измерения амплитуды колебаний в нагрузке инвертора, позволяющая получить сигнал обратной связи для автоматической системы акустического согласования и основанная на эффекте доплеровской модуляции ультразвукового поля.

4. Разработана система автоматического акустического согласования инвертора с нагрузкой, реализующая функцию выхода системы на экстремальное значение амплитуды колебаний в нагрузке и последующее поддержание данного режима в условиях изменения параметров нагрузки.

5. Построена имитационная модель инвертора с замкнутым контуром регулирования амплитуды колебаний в нагрузке. Модель позволяет проводить исследование режимов работы при изменении параметров нагрузки, элементов силовой схемы, а также алгоритмов управления.

6. Создана экспериментальная установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования работы инвертора в условиях изменения параметров нагрузки, элементов силовой схемы, а также алгоритмов управления. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов, что служит доказательством их адекватности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Николаев, А.А.** Модуляция ультразвукового сигнала, рассеянного на вращающемся валу двигателя [Текст] / А.А. Николаев, А.В. Дроздов, Л.А. Славутский // Вестн. Чуваш. ун-та.- 2005.- №2.- С. 199.
2. **Николаев, А.А.** Оптимизация работы ультразвуковых магнитострикционных преобразователей противонакипных устройств [Текст] / А.А. Николаев, В.С. Генин, Л.А. Славутский // Электротехника.- 2006.- №2.- С. 48-52.
3. **Николаев, А.А.** Изменчивость радиосвязи между модулями распределенной системы управления энергетическими объектами [Текст] / А.А. Николаев, А.В. Баштанар, Л.А. Славутский // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.- 2007.- №11.- С.20-22.
4. **Николаев, А.А.** Дистанционный контроль ультразвуковых магнитострикционных преобразователей противонакипных устройств [Текст] / А.А. Николаев, Л.А. Славутский // Вестн. Чуваш.о ун-та.- 2008.- №2.- С. 228-232.
5. **Николаев, А.А.** Моделирование тиристорного автономного последовательно-резонансного инвертора с магнитострикционной ультразвуковой колебательной системой в качестве нагрузки [Текст] / А.А. Николаев, Л.А. Славутский // Вестн. Чуваш. ун-та.- 2009.

Опубликованных в других научных изданиях

6. **Николаев, А.А.** Оптимальное двухмодовое возбуждение ультразвуковых магнитострикционных преобразователей [Текст] / А.А. Николаев, Л.А. Славутский, А.В. Рекеев и др. // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы всерос. конф.- Чебоксары. 2003.
7. **Николаев, А.А.** Электромеханические характеристики и оптимизация работы ультразвуковых противонакипных устройств [Текст] / А.А. Николаев, Л.А. Славутский, А.В. Рекеев и др. // Тр. акад. электротехн. наук Чувашской республики.- Чебоксары.- 2003.- №2.- С. 32-37.
8. **Николаев, А.А.** Ультразвуковые доплеровские измерения скорости и вибраций [Текст] / А.А. Николаев, Л.А. Славутский // Тр. акад. электротех. наук Чувашской республики.- Чебоксары.- 2004.- №3.- С. 25-26.
9. **Николаев, А.А.** Амплитудная и частотная модуляция ультразвукового сигнала при дистанционном контроле скорости вращения [Текст] / А.А. Николаев, Л.А. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы всерос. конф.- Чебоксары, 2005, С. 215.
10. **Николаев, А.А.** Ультразвуковой тахометр на основе частотной или амплитудной модуляции сигнала [Текст] / А.А. Николаев, Л.А. Славутский // Тр. акад. электротех. наук Чувашской республики.- Чебоксары.- 2005.- №2.- С. 67.
11. **Николаев, А.А.** Передача информации по радиоканалу в беспроводных системах управления энергетическими объектами [Текст] / А.А. Николаев, А.В. Баштанар, Л.А. Славутский и др. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VI Всероссийской научно-технической конференции.- Чебоксары.- 2006.- С. 330-335.
12. **Николаев, А.А.** Изменчивость уровня радиосигнала в беспроводных системах управления энергетическими объектами [Текст] / А.А. Николаев, А.В. Баштанар, Л.А. Славутский // Тр. акад. электротехн. наук Чувашской республики.- Чебоксары.- №2.- 2006.- С. 67-69.
13. **Николаев, А.А.** Изменчивость уровня радиосигнала в беспроводных системах управления энергетическими объектами [Текст] / А.А. Николаев, А.В. Баштанар, Л.А. Славутский // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: материалы всерос. науч. конф., посв. 75-летию КГТУ им. А.Н.Туполева.- Казань.- 2007.
14. **Николаев, А.А.** Применение радиомодемов стандарта IEEE802.15.4 (ZigBee) в системах промышленной автоматизации [Текст] / А.А. Николаев, В.А. Чумычкин // Новости электроники.- 2007.- №9. С. 23-25.
15. **Николаев, А.А.** Моделирование тиристорного генератора ультразвуковых противонакипных устройств [Текст] / А.А. Николаев А.А., Л.А. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы всерос. конф.- Чебоксары.- 2009.- С. 334-337.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве и использованных в диссертации: в работах [3, 4, 5, 8-15] соискателю принадлежит разработка основных теоретических положений, проведение экспериментальных исследований и анализ их результатов; в [1] - разработка основных теоретических положений; в

[6] – проведение и анализ результатов экспериментальных исследований; в [2, 7] – разработка основных технических решений.

Автор выражает глубокую признательность соавторам опубликованных работ за плодотворное сотрудничество.

Формат 60×84/16. Бумага писчая. Объем 1 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ №123.

Отпечатано в типографии Чувашского госуниверситета.

428015, Чебоксары, Московский просп., 15