

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
"ОДЕССКАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ"**

На правах рукописи

**Хнюнин Сергей Георгиевич**

УДК 681.586.773:629.563.21

**МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СОЗДАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ  
СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТА КОАНДА НА БАЗЕ  
ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор  
В.В. Никольский

Одесса – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРЕДМЕТА ИССЛЕДОВАНИЯ И ФОРМУЛИРОВКА РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ.....	13
1.1. Особенности эксплуатации АВРК .....	13
1.2. Классификация методов борьбы с эффектом Коанда .....	25
1.2.1. Наклон колонки АВРК.....	25
1.2.2. Использование насадки на винт.....	27
1.3. Общая методика диссертационного исследования .....	29
1.3.1. Выбор темы научного исследования .....	29
1.3.2. Обоснование цели и задач диссертационного исследования .....	32
1.3.3. Системный подход к разработке технологической карты научного исследования .....	33
1.4. Выводы к главе 1.....	36
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧЕК РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ .....	38
2.1. Выбор метода исследования прочностных характеристик азимутального гребного движителя .....	38
2.2. Математическая модель определения прочностных характеристик азимутального гребного движителя.....	41
2.3. Исследование модели АВРК.....	49
2.4. Определение возможных типов датчиков, используемых системой .....	56
2.4.1. Резистивные измерительные преобразователи (РИП).....	57

2.4.2. Тензометрические ИП .....	58
2.4.3. Оптические датчики .....	60
2.4.4. Пьезоэлектрические преобразователи .....	61
2.5. Выводы к главе 2.....	65
<b>ГЛАВА 3 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДАТЧИКОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ .....</b>	<b>67</b>
3.1. Модель датчика с биморфом .....	67
3.2. Модель датчика пьезотрансформатор по напряжению .....	72
3.3. Модель датчика с использованием генераторного режима.....	74
3.4. Моделирование биморфного пьезопреобразователя.....	75
3.5. Анализ функциональных свойств пьезопреобразователей .....	83
3.6. Выводы по разделу 3 .....	91
<b>ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТА КОАНДА .....</b>	<b>93</b>
4.1. Компьютерно-интегрированная система определения эффекта Коанда с расположением датчиков в дейдвудном подшипнике .....	93
4.2. Компьютерно-интегрированная система определения эффекта Коанда с расположением датчиков в точке крепления мотогондоллы АВРК.....	97
4.3. Исследование работы опытного стенда.....	100
4.4. Исследование работы системы на натурной модели многофункциональной платформы.....	110
4.5. Выводы по разделу 4 .....	117
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>119</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>121</b>

ПРИЛОЖЕНИЯ.....	142
Приложение А. Акт использования результатов диссертационной работы в учебном процессе Национального университета "Одесская морская академия".....	143
Приложение Б. Патент № 100819 .....	144
Приложение В. Патент № 107006.....	150

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

АБПЭ	–	асимметричные биморфные пьезоэлементы;
АВРК	–	азимутальная винто-рулевая колонка;
АРЩ	–	аварийный распределительный щит;
АПС	–	аварийно-предупредительная сигнализация;
АЦП	–	аналогово-цифровой преобразователь;
ВПУ	–	валоповоротное устройство;
ВФШ	–	винт фиксированного шага;
ВРК	–	винто-рулевая колонка;
ВРШ	–	винт регулируемого шага;
ГД	–	главный двигатель;
ГПК	–	главный пусковой клапан;
ГОС	–	гибкая обратная связь;
ГРЩ	–	главный распределительный щит;
ДАУ	–	дистанционное автоматизированное управление;
ДВС	–	двигатель внутреннего сгорания;
ДГ	–	дизель-генератор;
ДП	–	динамическое позиционирование;
ЖОС	–	жесткая обратная связь;
ЗУ	–	задающее устройство;
ИМ	–	исполнительный механизм;
ИОМ	–	изодромная обратная связь;
КИП	–	контрольно-измерительные приборы;
МКУБ	–	международный кодекс управления безопасностью;
МКЭ	–	метод конечных элементов;
МО	–	машинное отделение;
ОР	–	объект регулирования;
РЩ	–	распределительный щит;

САР	–	система автоматического регулирования;
СДВС	–	судовой двигатель внутреннего сгорания;
СТС	–	судовое техническое средство;
УМ	–	усилитель мощности;
ЦАП	–	цифро-аналоговый преобразователь;
ЦПУ	–	центральный пункт управления;
ЧЭ	–	чувствительный элемент;
AD	–	actuator disk (диск силового привода);
CFD	–	computational fluid dynamics (вычислительная гидродинамика);
IDE	–	Integrated development Environment;
PIV	–	particle image velocimetry (оптический метод измерения полей скорости);
RANS	–	(Reynolds-averaged Navier-Stokes) усредненные уравнения Рейнольдса.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи повышения безопасности эксплуатации азимутальной винто-рулевой колонки (АВРК).

АВРК, применяемые с середины прошлого столетия, позволили увеличить маневренность судна и снизить потери энергии за счет изменения направления упора винта относительно продольной оси судна на  $360^\circ$ . В процессе развития АВРК прошли путь от простых движителей для буксира, где главным требованием было повышенное маневрирование в стесненных условиях, до повсеместного применения на судах. На сегодняшний момент они применяются не только в качестве вспомогательных движителей, но и во многих случаях как основные, при этом их мощность может достигать 6000 кВт [1].

Однако в отличие от обычных традиционных схем расположения винтов в корме эксплуатация АВРК при определенных углах поворота стала сопровождаться проявлением эффекта Коанда, когда поток от винта прилипает к днищу судна [2]. Это приводит к потере упора винта до 15 %. В результате теряется управляемость судна или буровой платформы, что приводит к возникновению аварийной ситуации [3]. В этом направлении проведен ряд работ [4, 5] компанией "ABB Group" и учеными Maciel P., Коор А., Vaz G.

Результатом воздействия данного эффекта является неравномерный износ дейдвудного, упорного и опорных подшипников. Диагностика, плановое обслуживание и ремонт данных устройств затруднен в связи с конструктивной особенностью нахождения всей конструкции ниже ватерлинии под днищем судна. В случае несвоевременного выявления данных неисправностей возможен выход всего привода из строя, пожар, потеря управляемости и рушения. Поэтому исследования, направленные на определение и предупреждение возникновения эффекта Коанда являются

актуальными.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Исследование отвечает основным принципам Транспортной стратегии Украины на период до 2020 года, в частности, "Обеспечение безопасности транспортных процессов путем внедрения современных информационных технологий, "Повышение экологичности и энергоэффективности транспортных средств путем оптимизации срока эксплуатации, технического обслуживания и ремонта транспортных средств" (расп. КМУ № 2174 от 20.10.2010 р.) и планом выполнения научно-исследовательских работ Национального университета «Одесской морской академии» по темам "Автоматизація технологічних та адміністративних процесів на транспорті", "Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда" и "Концепції, технології та напрямки удосконалення суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів". Результаты исследований, вошедшие в диссертационную работу, отображены в отчетах в НИР №№ ДР 0115U003577, ДР С115U003579, ДР 0114U000340, в разработке которых автор принимал участие как исполнитель отдельных разделов.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является повышение безопасности эксплуатации судов торгового и военно-морского флотов путем уменьшения аварийной эксплуатации азимутальной винто-рулевой колонки за счет разработки методов и средств создания компьютерной системы определения эффекта Коанда.

В работе поставлены и решены следующие задачи:

- провести анализ конструкций АВРК и существующих методов противодействия возникновению эффекта Коанда с целью выявления их недостатков;
- разработать метод определения мест наибольшей напряженности АВРК с целью поиска мест размещения компонентов компьютерной системы определения возникновения эффекта Коанда;



- построить модели и провести расчеты параметров компонентов компьютерной системы с целью разработки их конструкций;
- разработать и исследовать функциональные и схемотехнические модели биморфных пьезоэлементов, исследовать реакцию преобразователей на сигналы специальной формы;
- синтезировать структурные схемы компьютерной системы определения возникновения эффекта Коанда;
- разработать стенд для натурных испытаний компьютерной системы, включая первичные преобразователи, аппаратную часть и программное обеспечение, а также разработать макет, имитирующий момент возникновения эффекта Коанда при работе АВРК.

**Объект исследования** – процессы определения эффекта Коанда с помощью компьютерных систем при эксплуатации азимутальной винтовой рулевой колонки.

**Предмет исследования** – модели, методы и средства создания компьютерной системы определения эффекта Коанда.

**Методы исследования.** В диссертации для решения научных задач использованы следующие методы исследований: дедукции – при выборе направлений диссертационного исследования; экспертной оценки – при выборе темы и постановка цели исследования и анализе результатов (обработка экспертных оценок); системного анализа – при разработке технологии научных исследований; конечно-разностный – для численного решения уравнений; физического и математического моделирования – для исследования процессов статических нагрузок; математического моделирования – для разработки способа регистрации отклонения валопровода; физического эксперимента – при определении параметров процесса физической модели.

**Научная новизна исследования** заключается в создании моделей и методов разработки компьютерной системы определения возникновения эффекта Коанда при эксплуатации АВРК многофункциональных морских

платформ, позволяющей снизить аварийность и улучшить работу системы динамического позиционирования полупогружных плавучих буровых установок. Отличие предложенной системы от существующих механических заключается в возможности отказа от громоздких механических конструкций, снижающих КПД пропульсивного комплекса, и снизить аварийность их эксплуатации.

При этом, впервые получены следующие научные результаты:

- впервые разработан метод определения эффекта Коанда на основе фиксации отклонений судового валопровода под действием внешней силы, осуществляемое с помощью датчиков, расположенных в контрольных точках;

- впервые разработан метод определения зон наибольшего напряжения АВРК, который позволил получить пространственный график ее нагрузок, что позволяет располагать датчики фиксации отклонений судового валопровода в точках максимального воздействия;

- усовершенствованы модели биморфных пьезопреобразователей, что позволило определить физические параметры и характеристики первичных преобразователей, входящих в состав компьютерной системы определения эффекта Коанда;

- получили дальнейшее развитие функциональные и схемотехнические модели пьезопреобразователей за счет учета параметров полиморфных элементов, что позволило выбирать оптимальные формы, типы и размеры пьезопреобразователей.

**Практическое значение полученных результатов** заключается в следующем: проведены исследования и построена компьютерная модель АВРК; разработаны математические, функциональные и схемотехнические модели, позволяющие определять силу, действующую на валопровод; разработан алгоритм замеров усилия, прилагаемого к валопроводу. Приведены практические рекомендации по расчету, конструированию и эксплуатации предлагаемой системы.

Предложена и запатентована система определения для выявления возникновения эффекта Коанда путем введения в конструкцию ВРУ датчиков, расположенных в точках наибольшего напряжения и позволяющих зарегистрировать момент возникновения и последующие воздействия на конструкцию ВРУ.

Разработано программное обеспечение для собранного программно-технического комплекса системы определения эффекта Коанда, позволяющее зафиксировать момент возникновения данного эффекта и передать информацию в систему управления пропульсивным комплексом.

Результаты диссертационного исследования внедрены: в учебный процесс, при проведении учебных занятий по специальности "Автоматизированное управление технологическими процессами" и "Эксплуатация судовых энергетических установок" в Национальном университете "Одесской морской академии" (акт внедрения от утверждено Первым проректором НУ «ОМА» 03.01.2017 г.).

**Личный вклад соискателя.** Все результаты, приведенные в диссертационной работе, выносимые на защиту, получены соискателем лично. В научных статьях, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат следующие результаты: [1-3, 5, 6] – постановка задач, анализ полученных результатов; [7-9, 15, 16] – результаты информационного поиска и систематизация работ по теме исследования, участие в разработке основных положений, которые предлагаются; [10-12, 17-20] – разработка метода и основных положений определения эффекта Коанда с помощью компьютерной системы; [21, 22] – предложение основной идеи построения судовой системы мониторинга для предупреждения эффекта Коанда, формулировка формулы полезной модели.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения, отдельные разделы и научные результаты докладывались, обсуждались и были одобрены на: научно-технической конференции "Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт" (Одесса, 24 – 25 марта 2015 г.);

международных научно-технических конференциях "The 12th International Conference on Engine Room Simulators: Proceeding" (Istanbul Technical University, Istanbul, 19 – 20 November, 2015), «Суднові комп'ютерно-інтегровані технології» (Одесса, 09 – 10 ноября 2016 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 22 научных работах, из которых: 15 статей, в том числе одна в журнале, который индексируется в наукометрической базе Scopus, 5 публикаций в сборниках материалов международных конференций, 2 патента Украины.

# ГЛАВА 1

## СОСТОЯНИЕ ПРЕДМЕТА ИССЛЕДОВАНИЯ И ФОРМУЛИРОВКА РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

### 1.1 Особенности эксплуатации АВРК

В 1950 году Йозефом Беккером, была разработана и произведена установка с азимутальной винторулевой колонкой (АВРК). За последующий период эти установки себя положительно зарекомендовали на судах требующих повышенной маневренности в стесненных условиях. В 1990 году фирма "ABB Group" поместила высокомоментный электродвигатель внутри корпуса гондолы АВРК и установила его на буксир "Seilin" зарегистрировав его под брендом Azipod®. С этого момента этот тип установок начал широко применяться и на других типах судов.

Сегодня азимутальные винторулевые колонки мощностью до 20 МВт являются превосходным пропульсивным решением для широкого спектра судов. Примером могут служить большие яхты и пассажирские суда, суда смешанного (река-море) типа, буксиры, спасательные суда, научно исследовательские суда, ледоколы и военные суда прибрежной зоны [14–17].

В последнее время с развитием технологий и повышением требований к точности позиционирования плавучих буровых платформ и научно исследовательских судов, а также для упрощения маневров в стесненных условиях суда все чаще оборудуются азимутальными винторулевыми колонками. Они могут быть установлены как дополнительно, так и в качестве основной движительной установки [18]. Главная задача заключается в том, чтобы обеспечить устойчивость платформы и управляемость в широком диапазоне этих типов судов.

Однако, в ходе эксплуатации АВРК возникают ситуации, при которых снижается безопасная и эффективная их работа. Так одним из вариантов является случай медленного движения по курсу для судов-кабелеукладчиков и фиксации позиции для полупогружных буровых платформ (ППБУ) и научных судов. Для удержания объекта на позиции АВРК направляет поток воды под днище судна и в этом случае существует вероятность возникновения эффекта Коанда, при котором поток "прилипает" к днищу судна [2]. При этом сила, действующая на винт, приводит к отклонению гребного вала, что влечет за собой повышенный износ дейдвудного, упорного и опорных подшипников. В связи с конструктивной особенностью нахождения АВРК ниже ватерлинии под днищем судна затруднен доступ к диагностике, планового обслуживания и ремонта. Работа буровых платформ основана на длительном сроке эксплуатации и преждевременный выход из строя одной из АВРК входящих в систему динамического позиционирования может привести к трагическим последствиям, многомиллиардным потерям и техногенной катастрофе [3, 19].

К сожалению, предугадать и просчитать этот возникающий процесс с детализацией всех параметров не представляется возможным, т.к. на возникновение эффекта Коанда влияет множество факторов, не позволяющих точно предсказать момент появления этого эффекта. К ним можно причислить:

- скорость судна;
- скорость и направление вращения винта;
- скорость течения;
- химический состав и глубина водной поверхности;
- температура, влажность и давление воздушной среды;
- скорость и направление других ВРУ, работающих совместно и входящих в систему динамического позиционирования.

Рассматривается работа азимутальных пропульсивных

электродвигателей, проблем, возникающих при их эксплуатации и способов устранения проблем посредством автоматической системы защиты. Уделено внимание азимутальными электродвигателям. Под этим понятием рассматриваются такие судовые пропульсивные системы [20–24], которые могут создавать вектор тяги в горизонтальной плоскости в любом направлении посредством вращения гребной установки вокруг вертикальной оси непрерывно. Изменение значения тяги производится посредством винта регулируемого шага (ВРШ, CPP – Controllable Pitch Propeller) либо количеством оборотов винта [25, 26]. Электродвигатель может быть размещен в подвесной гондоле (podded propulsor), размещенной ниже ватерлинии под днищем судна и позволяет приводить гребной винт без использования сложных и труднообслуживаемых механических передач.

Азимутальное подруливающее устройство – это гребной винт, расположенный в поворачивающейся на  $360^\circ$  колонке. Такое устройство заменяет руль и позволяет швартоваться в стеснённых условиях, не привлекая буксир [27]. Азимутальное подруливающее устройство может быть, как дополнительным двигателем корабля, так и основным. Азимутальные устройства представлены на рынке широким выбором и существенно разнятся по своим типам.

По типу передачи:

- механическая с вертикальным валом (англ. L-drive) (рис. 1.1, *а*);
- механическая с горизонтальным валом (англ. Z-drive) (рис. 1.1, *б*);
- электрическая (англ. Azipod) (рис. 1.2).

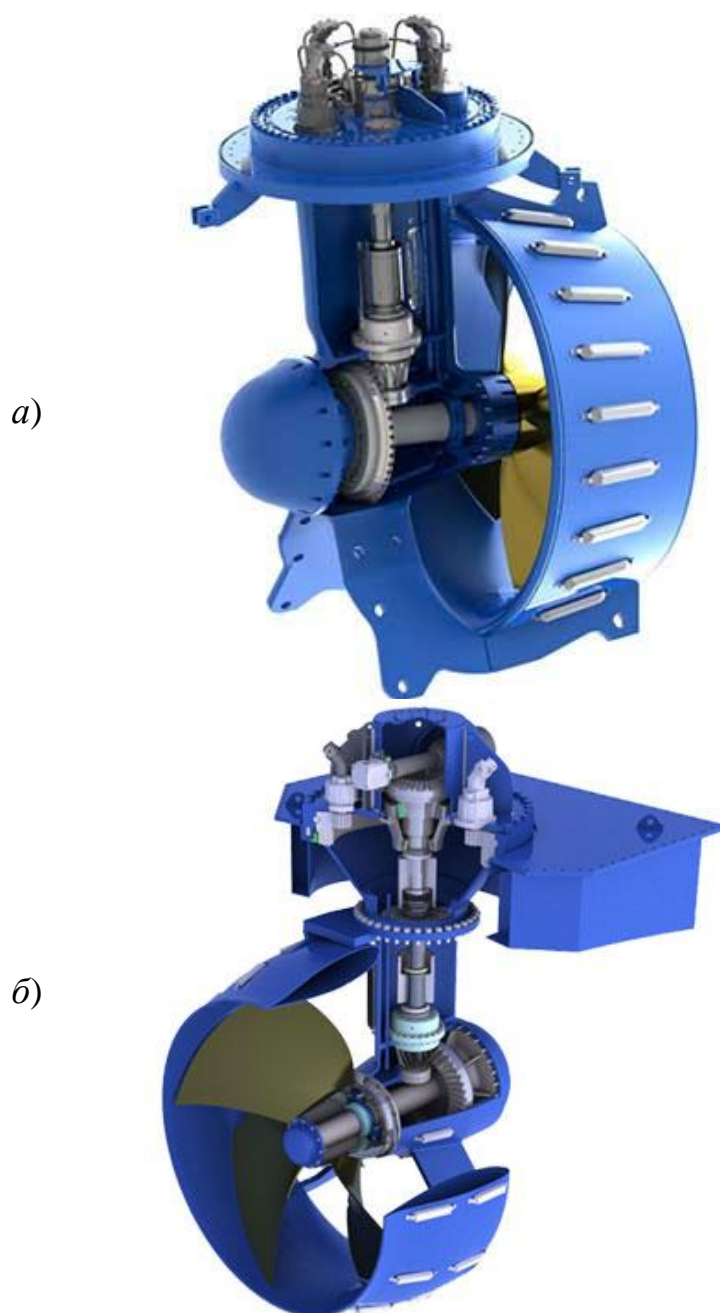


Рис. 1.1. Устройство азимутального подруливающего устройства:

*a)* – L-drive типа; *б)* – Z-drive типа

По количеству винтов в колонке:

- одновинтовое;
- двухвинтовое тандемное (винты вращаются в одну сторону);
- двухвинтовое оппозитное (винты вращаются в разные стороны).

Для повышения маневренности некоторых судов получили активное распространение универсальные азимутальные электродвижители,



разработанные фирмой ABB Group, так называемые активные рули, получившие название "Azipod".

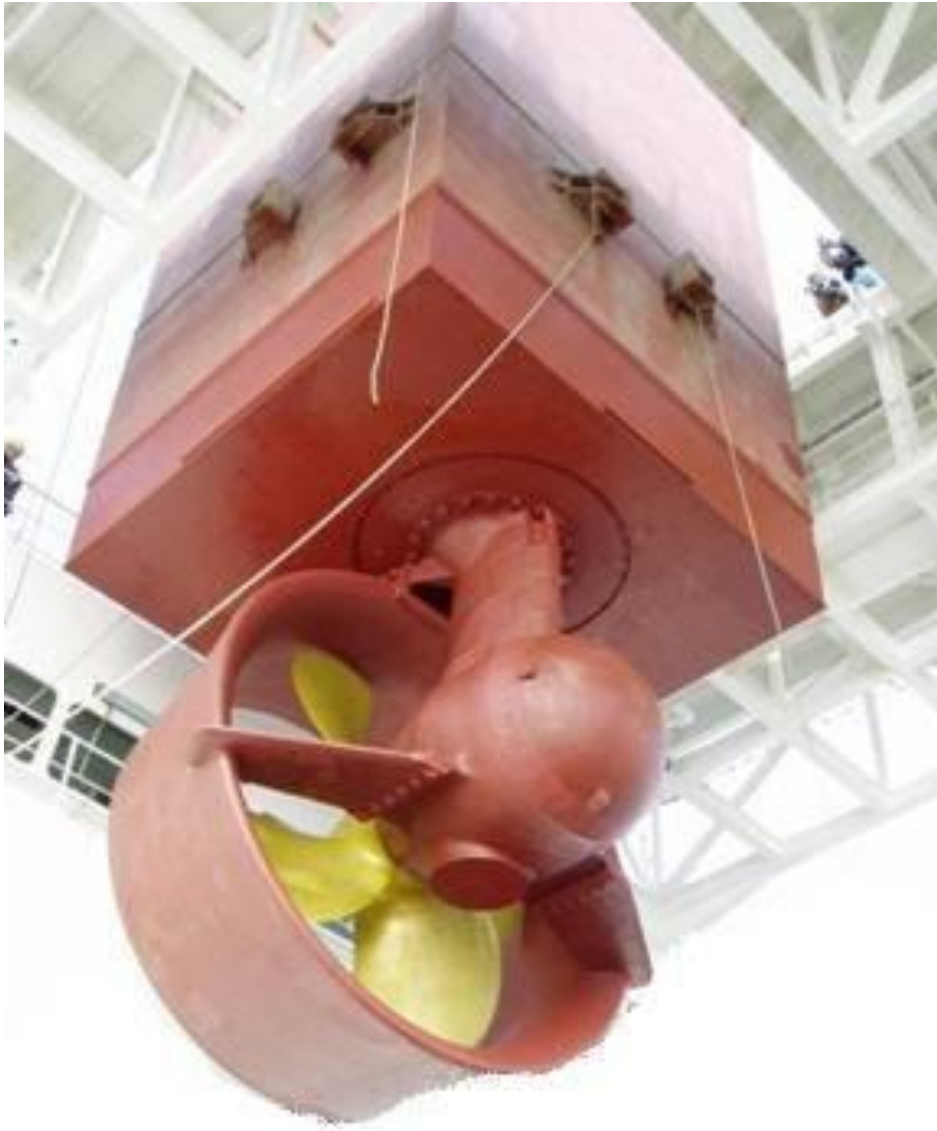


Рис. 1.2. Устройство азимутального подруливающего устройства типа Azipod на буровой установке

Описанную классификацию АВРК можно представить, как показано на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Классификация АВРК

Взаимодействие потока с корпусом судна.

Основными потерями при работе гребной установки являются взаимодействие потока двух гребных винтов (thruster-thruster interaction) и взаимодействие потока с корпусом судна (thruster-hull interaction). Эти эффекты получили в исследованиях общее название degradation effects (эффекты деградации) [28, 29].

Для оценки и исследования подобных физических явлений используются наряду с экспериментальными данными результаты вычислений методами вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Базой любого исследования в области вычислительной гидродинамики является формулировка основных уравнений гидродинамики потоков, а именно:

Уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0,$$

где  $\nabla$  – дивергенция;  $\rho$  – плотность ( $\text{кг/м}^3$ );  $t$  – время (с);  $j$  – плотность потока.

Для течений уравнение неразрывности может быть записано в терминах средних значений по поперечному сечению канала. Например, для течения в канале с известной зависимостью площади поперечного сечения  $S$  от координаты  $x$  вдоль канала уравнение неразрывности имеет вид

$$S \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v S) = 0,$$

где  $\rho = \rho(x, t)$  и  $v = v(x, t)$  – средние значения плотности и осевой проекции скорости по поперечному сечению. В частном случае стационарного течения отсюда получается уравнение неразрывности в виде

$$\rho v S = \text{const},$$

имеющее очевидный физический смысл постоянства потока массы, а в случае среды с постоянной плотностью – уравнение

$$v S = \text{const}$$

выражающее постоянство объемного расхода.

Уравнения сохранения импульса (Закон сохранения количества движения):

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F},$$

где  $\vec{p}$  – импульс системы (кг\*м/с);  $t$  – время (с);  $\vec{F}$  – равнодействующая сил, действующих на частицы системы (Н).

Уравнение сохранения энергии (Закон Бернулли):

$$\frac{v^2}{2} + w + gz = \text{const},$$

где  $v$  – скорость потока жидкости (м/с);  $w$  – тепловая функция жидкости (энтальпия);  $g$  – ускорение свободного падения (м/с<sup>2</sup>);  $z$  – координата точки в направлении силы тяжести (м).

Уравнение Навье-Стокса:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0,$$

где  $\nabla$  – оператор набла;  $\Delta$  – векторный оператор Лапласа;  $t$  – время (с);  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости ( $\text{м}^2/\text{с}$ );  $\rho$  – плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $p$  – давление (Па);  $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$  – векторное поле скоростей;  $\vec{f}$  – векторное поле массовых сил.

Уравнения Рейнольдса (RANS). Используются для описания турбулентных течений. Метод осреднения Рейнольдса заключается в замене случайно изменяющихся характеристик потока (скорость, давление, плотность) суммами осреднённых и пульсационных составляющих. В случае стационарного течения несжимаемой ньютоновской жидкости уравнения Рейнольдса записываются в виде

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right].$$

Переменные, осреднённые по времени, отмечены в этом уравнении чертой сверху, а пульсационные составляющие – апострофом. Левая часть уравнения (нестационарный член) описывает изменение количества движения жидкого объёма, вследствие изменения во времени осреднённой составляющей скорости. Это изменение компенсируется осреднёнными внешними силами  $\rho \bar{f}_i$ , осреднёнными силами давления  $-\bar{p} \delta_{ij}$  и вязкостными силами

$$\mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right).$$

Кроме того, в правую часть входят кажущиеся напряжения (напряжения Рейнольдса, турбулентные напряжения)  $\overline{\rho u'_i u'_j}$ , учитывающие дополнительные потери и перераспределение энергии в турбулентном потоке (по сравнению с ламинарным потоком).

Любое применение вычислительной гидродинамики состоит из следующих последовательных этапов, которые выполняются с

использованием специального программного обеспечения:

1. Подготовительный этап. На данном этапе формируется геометрия модели, формулируются необходимые физические условия, геометрия дискретизируется (создается сетка), задаются начальные и граничные условия дифференциальных уравнений.

2. Расчёт. На данном этапе машина, подчиняясь заданному алгоритму, численно решает основные уравнения с точки зрения базовых физических параметров, а также записывает результаты решения в память.

3. Анализ. Результаты решения отображаются в виде графиков, таблиц, а также контурных/векторных схем, привязанных к исходной геометрии.

Применение вычислительной гидродинамики для анализа эффектов деградации потока азимутального движителя по-прежнему в значительной степени неисследованная область. Эти эффекты имеют важное значение для проектирования судов, особенно для судов с динамическим позиционированием. Испытания реальной модели являются относительно дорогими и, как правило, становятся доступными сравнительно поздно в процессе проектирования технического средства. В качестве альтернативы, с применением вычислительной гидродинамики различных конструкций судов и движителей могут быть исследованы эффекты взаимодействия экономным способом на ранней стадии процесса проектирования.

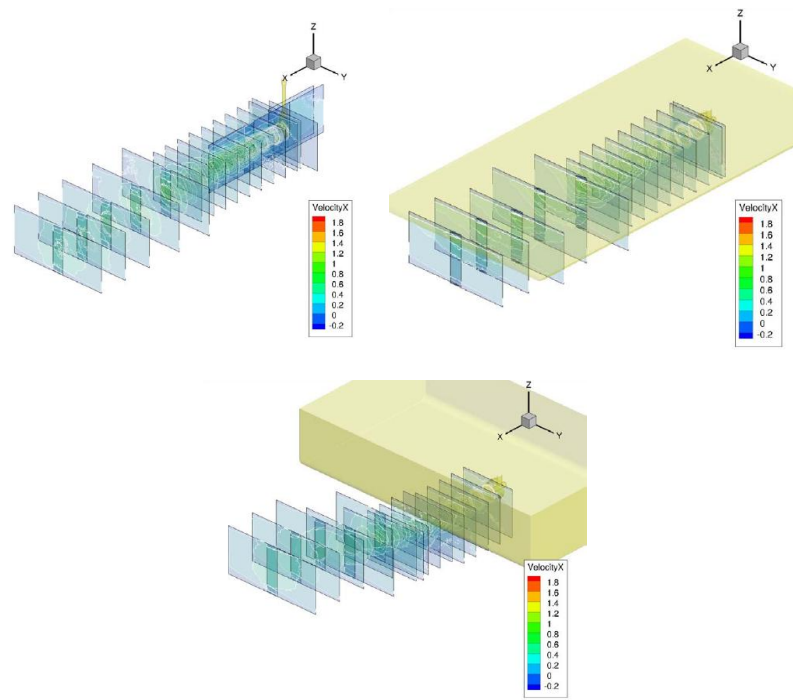
В качестве пакета вычислительной гидродинамики используется Marin ReFRESKO [30], данные по этой версии, который используется широко в целях визуализации потоков вокруг различных объектов. ReFRESKO решает многофазные нестационарные несжимаемые RANS-уравнения (Рейнольдса усредненные уравнения Навье-Стокса) уравнений, дополненных моделями турбулентности и транспортных объемно-дробных уравнений для каждой фазы. Уравнения дискретизируется с использованием метода конечных объемов в физическом пространстве. Реализация поверхностно-ориентированная, что позволяет генерировать

сетки с произвольным числом граней или локально очищенные сетки с висящими узлами.

При визуализации потока от азимутального движителя принята модель, при которой винт представлен в виде диска силового привода [5] (AD, Actuator Disk). Модель AD заменяет лопасти винта эквивалентным распределением силы по всему объему винта. Такая модель – это применение RANS-уравнений на модель винта.

Результаты моделирования потока от движителя в открытой воде, под корпусом и на окончании корпуса, а также распределение компонентов тяги представлены на рис. 1.4 и 1.5 соответственно.

Анализируя полученные результаты на рис. 1.4 и 1.5 можно сделать вывод, что присутствуют значительные тангенциальные силы и некое явление "притягивания" потока к корпусу судна, что создаёт деградацию тяги и увеличение коэффициента вычета тяги показанного на рис. 1.6. С этим связано излишняя нагрузка на подвесную нагрузку, создающая механические напряжения, что повреждает наиболее критичные детали конструкции: подшипники, уплотнения, вал [31 – 33]. Кроме того, это ухудшает позиционирование. Как видно из результатов и практики производства подобных агрегатов самым распространенным явлением для борьбы с этими деградациями является использования сопел, наклонённых примерно на 7 градусов относительно плоскости днища корпуса. Тем не менее, это решение так же подвержено подобным эффектам, а также существенно снижает эффективность установки, что связано с повышенным расходом топлива и загрязнением окружающей среды [34 – 40].

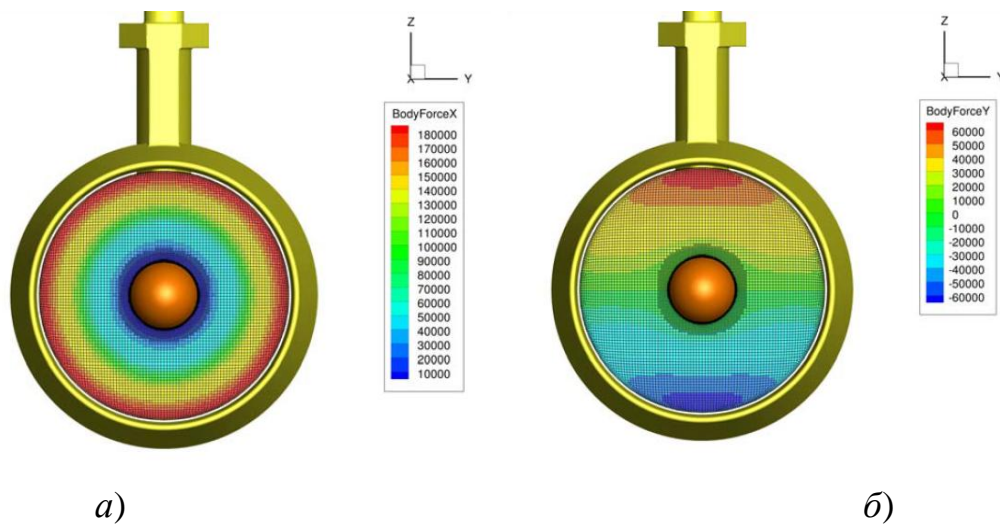


a)

б)

в)

Рис. 1.4. Результат моделирование потока от азимутального движителя: а) – для открытого водяного пространства; б) – под корпусом судна; в) – у окончания корпуса судна



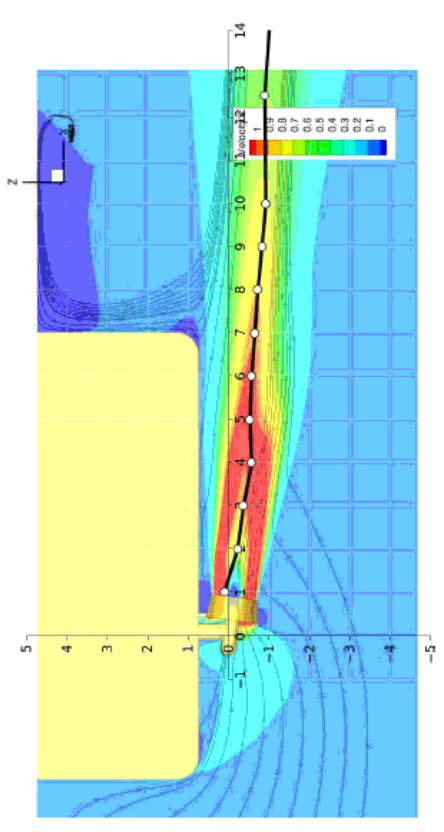
a)

б)

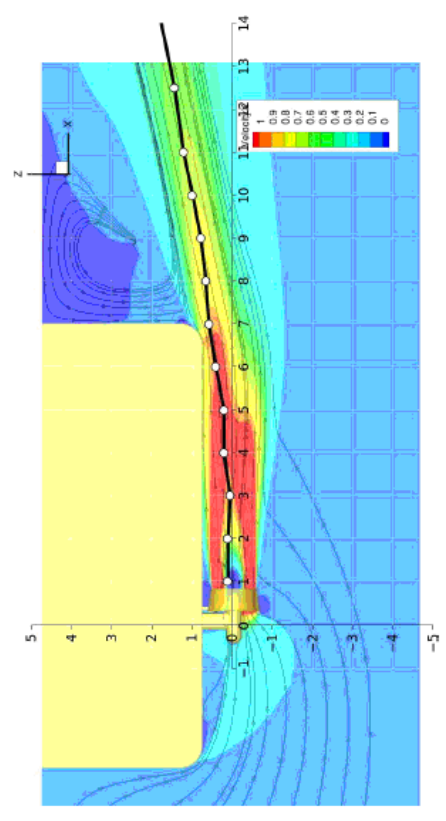
Рис. 1.5. Распределение компонентов тяги: а) – осевых; б) – тангенциальных



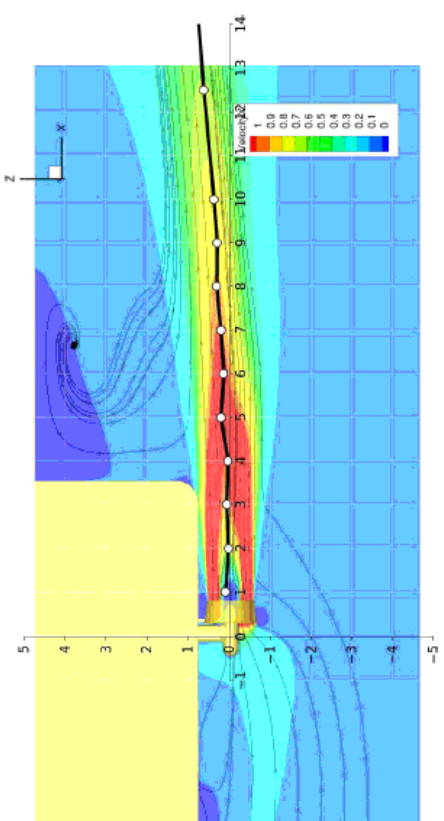
а)



б)



в)



г)

Рис. 1.6. Направления потока в слое азимутального двигателя: а) — и расположением под корпусом с прямым соплом и расположением под корпусом; б) — с прямым соплом с расположением под корпусом и увеличенным радиусом скулового округления; в) — с прямым соплом и расположением у окончания корпуса; г) — с наклонным соплом и расположением под корпусом



Данный гидродинамический феномен связан с эффектом Коанда. Эффект Коанда – это физическое явление, названное в честь румынского учёного Анри Коандэ (1886 – 1972). Коандэ в 1932 году обнаружил, что, струя жидкости, вытекающая из сопла, стремится отклониться по направлению к стенке и при определенных условиях прилипает к ней. Это объясняется тем, что боковая стенка препятствует свободному поступлению жидкости с одной стороны струи, создавая вихрь в зоне пониженного давления, что способствует появлению значительных сил, действующих на подвесную гондолу перпендикулярно направлению потока в направлении корпуса судна.

## **1.2 Классификация методов борьбы с эффектом Коанда**

При определенных углах поворота АВРК проявляет себя эффект Коанда, когда поток от винта прилипает к днищу судна [2]. В результате чего судно, либо буровая платформа, теряет управляемость либо сходит с позиции и это может привести к возникновению аварийной ситуации [3]. На данный момент можно произвести классификацию известных систем противодействия этому эффекту. Проанализируем достоинства и недостатки этих систем.

1.2.1 Наклон колонки АВРК. Данная проблема известна производителям АВРК. Так, фирмой "ABB Group" были проведены экспериментальные исследования возникновения эффекта Коанда, результатом которых стали рекомендации по введению в конструкцию баллера АВРК монтажного угла наклона. Максимальный результирующий монтажный угол (продольный и поперечный) рекомендуется  $4^\circ$  (рис. 1.7, б). Максимально допустимый суммарный угол монтажного угла и угла наклона составляет  $6^\circ$  [4].

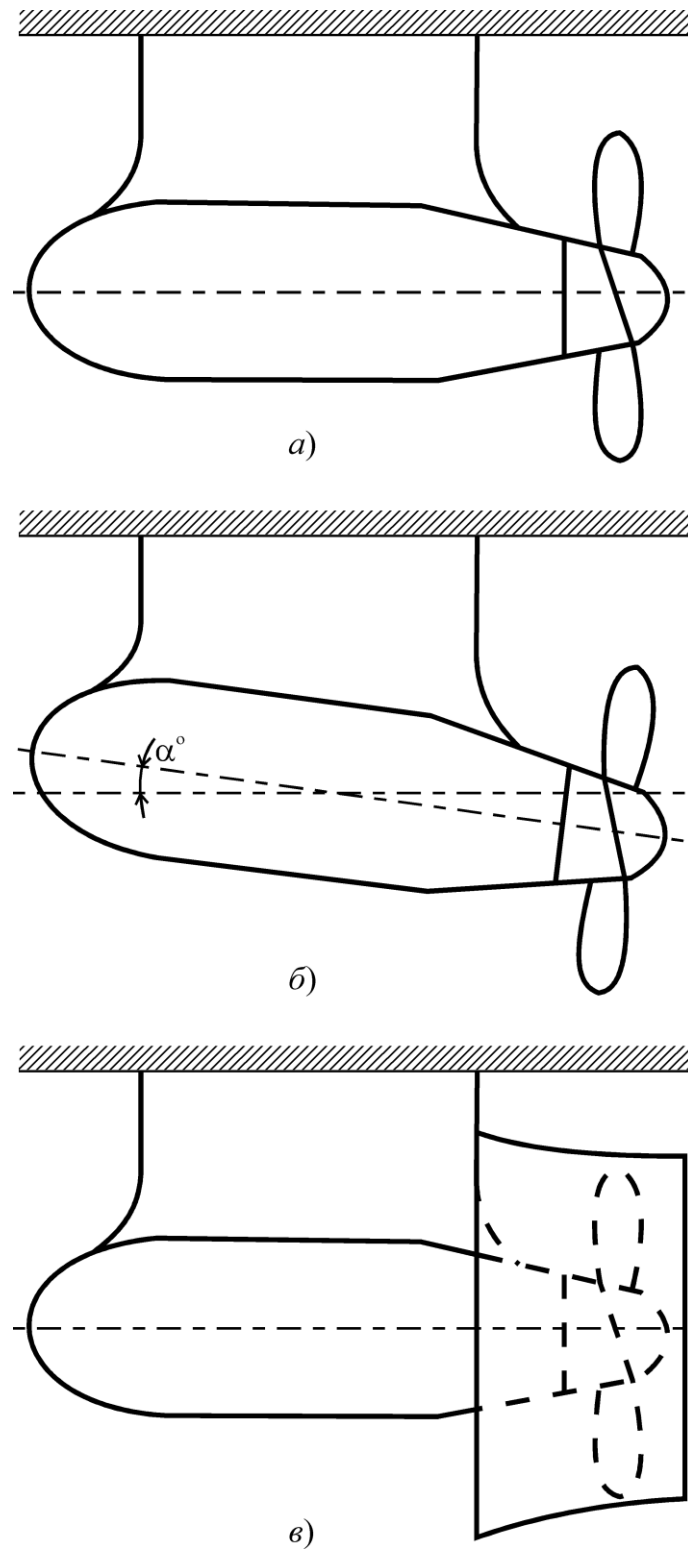


Рис. 1.7. Противодействие возникновению эффекта Коанда путем наклона конструкции АВРК: *а)* исходная конструкция без вмешательства; *б)* – введение в конструкцию монтажного угла наклона; *в)* – используя направляющую насадку на винт

1.2.2. Использование насадки на винт. Следующим методом борьбы является использование насадки на винт. Для этого винт заключают в трубу с лепестковыми направляющими отражателями (насадка с направляющими крыльями), показанными на рис. 1.7, в.

Сами насадки используются в судостроении для улучшения рабочих характеристик винта. Еще в 1925 Корт обобщив результаты исследований усовершенствовал данную конструкцию: превратил трубу в короткое сопло, диаметр которого на входе был больше, а форма соответствовала аэродинамическому профилю. Корт установил, что такая конструкция обеспечивает значительно больший упор при заданной мощности по сравнению с обычными винтами. Преимущество винта с направляющей насадкой над обычным винтом проверено практикой. Выигрыш выше, когда скорость судна невелика, а винт тяжело нагружен, т.е. велика скорость скольжения. В связи с этим винты с насадкой чаще ставят на буксирах, траулерах и аналогичных судах, которые буксируют тяжелые грузы с малой скоростью. Для таких судов выигрыш на единицу мощности, создаваемый винтом с насадкой, может достигать 30 – 40 %. На быстроходных судах винт с насадкой не имеет преимуществ, поскольку небольшой выигрыш в КПД теряется из-за увеличения сопротивления на насадке [41].

Однако наряду с преимуществами в эксплуатации насадки обладают и определенными недостатками [42]:

- при обрастании насадки винт быстро становится тяжелым, скорость судна заметно падает;
- при большом волнении и малом погружении насадки к винту может прорываться воздух;
- корпус насадки в том месте, где лопасти подходят наиболее близко, подвергается сильной эрозии;
- при переключках руля во время маневрирования из-за возникающего схода потока наблюдается сильная вибрация;

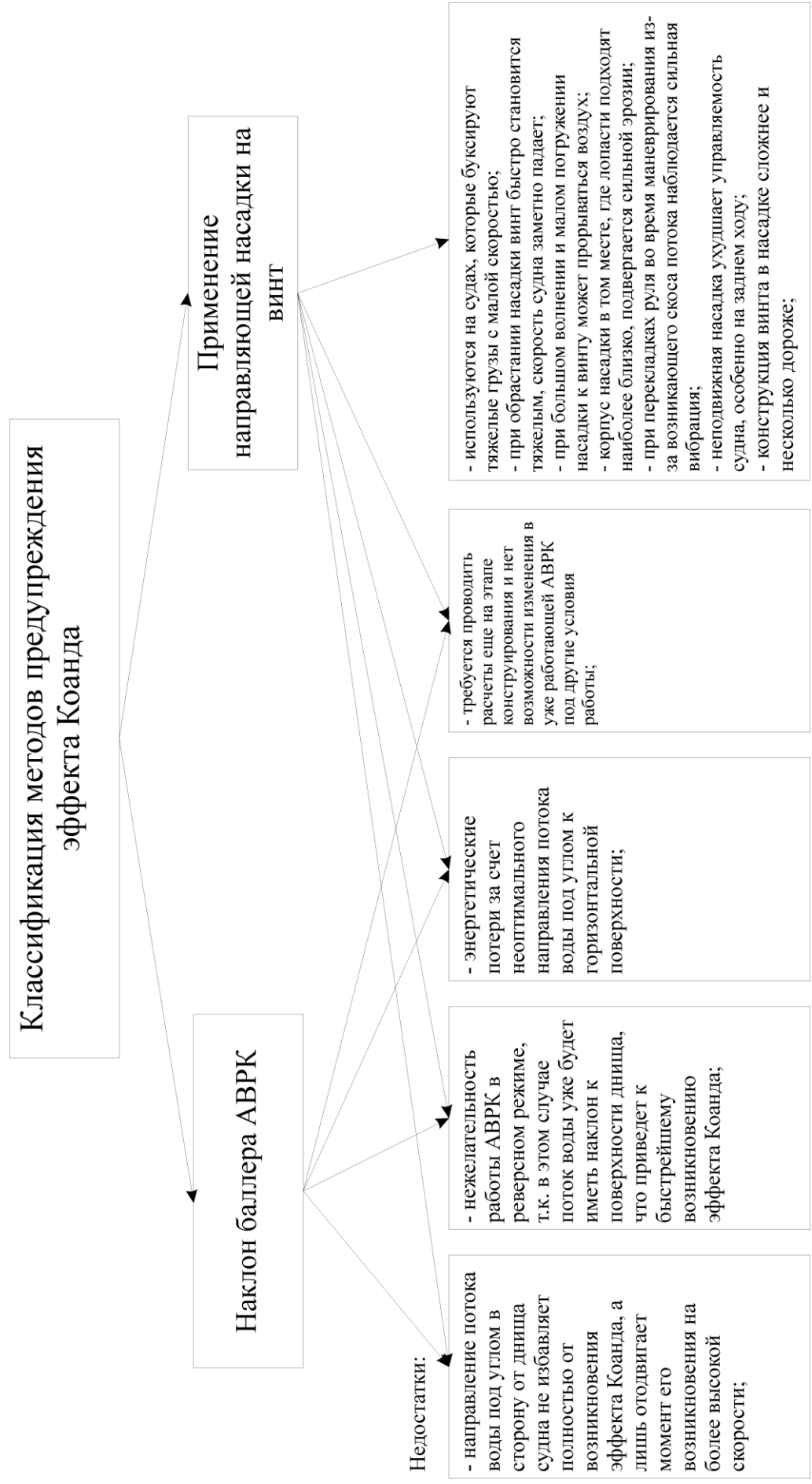


Рис. 1.8. Недостатки существующих методов борьбы с эффектом Коанда

– неподвижная насадка ухудшает управляемость судна, особенно на заднем ходу;

– конструкция винта в насадке сложнее и несколько дороже.

Эти методы механического противодействия позволяют бороться с возникающим эффектом, однако имеют ряд общих недостатков, показанных на рис. 1.8:

- усложнение конструкции АВРК;

- энергетические потери за счет неоптимального направления потока воды под углом к горизонтальной поверхности;

- направление потока воды под углом в сторону от днища судна не избавляет полностью от возникновения эффекта Коанда, а лишь отодвигает момент его возникновения на более высокой скорости;

- нежелательность работы АВРК в реверсном режиме. В этом случае поток воды уже будет иметь наклон к поверхности днища, что приведет к быстрейшему возникновению эффекта Коанда;

- необходимо проводить расчет наклона баллера или направляющей насадки еще на этапе конструирования и нет возможности внесения изменений в конструкцию уже работающей АВРК.

### **1.3 Общая методика диссертационного исследования**

1.3.1. Выбор темы научного исследования. Выбор направления научного исследования основан на проведенной экспертной оценке возможных вариантов решения задачи снижения аварийности и улучшения системы динамического позиционирования полупогружных плавучих буровых платформ по следующим критериям: актуальность, научная новизна, экономическая эффективность, соответствие паспорту специальности, а также основным направлениям научной специальности и научной школы [43].

Выполненная экспертная оценка значимости исследований по

технологическому совершенствованию элементов системы АВРК показала, что на современном этапе развития судовых азимутальных винто-рулевых колонок данный вариант решения поставленной задачи всесторонне изучен и не является актуальным.

Конструкционное совершенствование элементов АВРК в настоящее время также достигло своего максимума.

Оценка значимости варианта, связанного с разработкой новой конструкции АВРК не подтверждается его экономической эффективностью, в связи с длительностью этапов его внедрения.

По результатам экспертных оценок наиболее оптимальным и целесообразным следует признать вариант совершенствования системы АВРК путем реконструкции без внесения изменений в действующую конструкцию, в связи с этим именно на его развитие направлено научное исследование и тема диссертации.

Учитывая выбранное направление научного исследования, а также на основании результатов анализа информационного поиска, выполненного в первом разделе, была определена тема научного исследования – создание судовой системы для предупреждения эффекта Коанда.

Основным обоснованием выбора темы исследований также является следующее:

- судовые АВРК широко применяются на различных типах судов в качестве как главных, так и вспомогательных двигателей. Примером могут служить большие яхты и пассажирские суда, суда смешанного (река-море) типа, буксиры, спасательные суда, научно исследовательские суда, ледоколы и военные суда прибрежной зоны;

- в ходе эксплуатации АВРК возникают ситуации, при которых снижается безопасная и эффективная работа. Для удержания объекта на позиции в случае медленного движения по курсу для судов-кабелеукладчиков и фиксации позиции для полупогружных буровых платформ (ППБУ) и научных судов АВРК направляет поток воды под

днище судна и в этом случае существует вероятность возникновения эффекта Коанда, при котором поток "прилипает" к днищу судна;

- сила, действующая на винт, приводит к отклонению гребного вала, что влечет за собой его повышенный износ, а также повышенный износ дейдвудного, упорного и опорных подшипников;

- в случае длительного срока эксплуатации работы АВРК (на буровых платформах) преждевременный выход из строя одной из АВРК входящих в систему динамического позиционирования может привести к трагическим последствиям, многомиллиардным потерям и техногенной катастрофе.

Важность проведения исследований, связанных с вопросами повышения безопасности плавания, подтверждается программой экономических реформ, проводимых в Украине, а также Транспортной стратегией Украины на период до 2020 г., в частности, "Обеспечение безопасности транспортных процессов путем внедрения современных информационных технологий", "Повышение экологичности и энергоэффективности транспортных средств путем оптимизации срока эксплуатации, технического обслуживания и ремонта транспортных средств" (расп. КМУ № 2174 от 20.10.2010 р.).

Актуальность темы исследования базируется на запросе практики о необходимости поиска новых путей снижения аварийности и улучшения системы динамического позиционирования полупогружных плавучих буровых установок.

Научная направленность исследований соответствует паспорту специальности; профилю исследований, проводимых кафедрой теории автоматического управления и вычислительной техники Национального университета "Одесской морской академии"; основным направлениям специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты.

Научные исследования выполнялись в соответствии с тематикой госбюджетных научно-исследовательских работ Национального университета "Одесской морской академии" по темам "Автоматизация

технологічних та адміністративних процесів на транспорті", "Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда" и "Концепції, технології та напрямки удосконалення суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів". Результаты исследований, вошедшие в диссертационную работу, отображены в отчетах в НИР №№ ДР 0115U003577, ДР С115U003579, ДР 0114U000340 в разработке которых автор принимал участие как исполнитель отдельных разделов.

В качестве объекта исследования в диссертации выбрана азимутальная винторулевая колонка судов с ДР.

Предметом исследования является компьютерная система для обнаружения эффекта Коанда.

1.3.2 Обоснование цели и задач диссертационного исследования. Учитывая тему диссертационного исследования, была сформулирована цель работы – создание и совершенствование теоретической и программно-технической базы судовой системы мониторинга АВРК, имеющей высокие функциональные и эксплуатационные качества, которые обеспечивают безопасность эксплуатации судов торгового и военно-морского флотов.

Гипотеза научного исследования состоит в том, что изменение режима работы пропульсивного комплекса возможно при помощи электронных средств обнаружения возникновения эффекта Коанда для повышения безопасности эксплуатации морских объектов.

Главная задача диссертационного исследования заключается в создании метода определения начала (начального момента) отклонения судового валопровода под действием внешней силы.

Для решения главной задачи необходимо решение ряда вспомогательных задач, а именно:

– провести анализ конструкций АВРК и существующих методов противодействия возникновению эффекта Коанда с целью выявления их



недостатков;

- разработать метод определения мест максимальных напряжений АВРК с целью поиска мест размещения датчиков – компонентов компьютерной системы определения возникновения эффекта Коанда;

- построить модели и провести расчеты параметров компонентов компьютерной системы с целью разработки их конструкций;

- разработать и исследовать функциональные и схемотехнические модели биморфного пьезоэлемента, исследовать реакцию преобразователей на сигналы специальной формы;

- синтезировать структурные схемы компьютерной системы определения возникновения эффекта Коанда;

- разработать стенд для натурных испытаний компьютерной системы, включающий первичные преобразователи, аппаратную часть и программное обеспечение, а также разработать макет, имитирующий момент возникновения эффекта Коанда при работе АВРК.

Решение главной задачи диссертационного исследования выполнено путем синтеза научных результатов решения вспомогательных задач.

1.3.3 Системный подход к разработке технологической карты научного исследования. Системный анализ и системный подход к решению научной задачи позволяет оценить все факторы, способствующие достижению поставленной цели, и определить оптимальные способы их достижения [44, 45]. Определение "система" относится к философской категории научного познания, а комплекс вспомогательных задач, решаемых в любом диссертационном исследовании, переводит это понятие в категорию сложных систем. При решении научно-прикладных задач рассматриваются сложные системы, состоящие из большого числа отдельных элементов, которые находятся между собой во взаимосвязи и взаимодействии.

С учетом изложенного в диссертационном исследовании был

разработан замкнутый цикл научного исследования, который системно представлен в виде технологической карты исследования, приведенной на рис. 1.9.

Тема диссертационной работы формируется на основе "запроса практики" о необходимости поиска новых путей снижения аварийности и улучшения системы динамического позиционирования полупогружных плавучих буровых установок.

Тезисом решения главной задачи является научный прогноз о том, что снижения аварийности и улучшения системы динамического позиционирования полупогружных плавучих буровых установок может быть достигнуто за счет создания судовой системы для предупреждения эффекта Коанда.

В качестве практических значений полученных результатов диссертационного исследования получено следующее:

- проведены исследования и построена компьютерная модель АВРК;
- разработана математическая модель, позволяющая определять силу, действующую на валопровод;
- разработан алгоритм замеров усилия, прилагаемого к валопроводу;
- приведены практические рекомендации по расчету, конструированию и эксплуатации предлагаемой системы;
- предложена и запатентована система для выявления возникновения эффекта Коанда путем введения в конструкцию ВРУ датчиков, расположенных в точках наибольшего напряжения и позволяющих зарегистрировать момент возникновения и последующие воздействия на конструкцию ВРУ;

разработано программное обеспечение для собранного программно-технического комплекса системы определения эффекта Коанда, позволяющее зафиксировать момент возникновения данного эффекта и передать информацию в систему управления импульсивным комплексом.

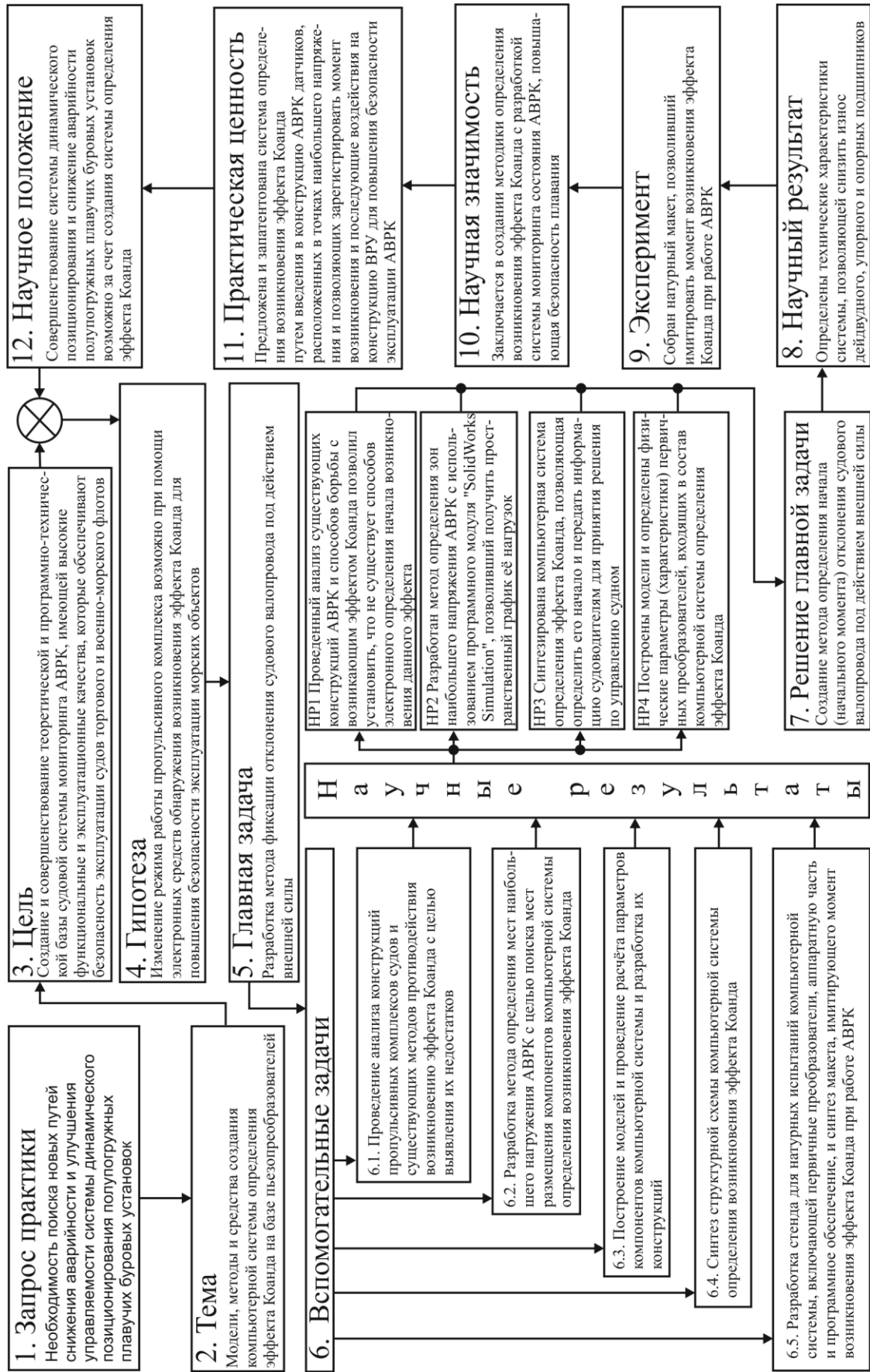


Рис. 1.9. Технологическая карта диссертационного исследования

Основные экспериментальные исследования, выполненные в работе, проводились в лабораторных и производственных условиях.

Значимость диссертационного исследования состоит в создании судовой системы для предупреждения эффекта Коанда для снижения аварийности и улучшения системы динамического позиционирования полупогружных плавучих буровых платформ.

Практическая ценность – предложена и запатентована система для выявления возникновения эффекта Коанда путем введения в конструкцию АВРК датчиков, расположенных в точках наибольшего напряжения и позволяющих зарегистрировать момент возникновения и последующие воздействия на конструкцию ВРУ для повышения безопасности эксплуатации АВРК.

В диссертационном исследовании выдвинуто и подтверждено научное положение: совершенствование системы динамического позиционирования и снижение аварийности полупогружных плавучих буровых установок возможно за счет создания системы определения возникновения эффекта Коанда

#### **1.4. Выводы к главе 1**

1. В результате выбора темы диссертационного исследования по признакам актуальности, научной новизны, практической значимости, соответствии паспортам специальностей и основным направлениям специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты:

– методы и средства обеспечения эффективности, надежности, контроля, диагностики, определения параметров, отладки, испытания, а также проектирование высокоэффективных, надежных, пригодных для контроля и диагностики компьютерных систем и сетей, их устройств и компонентов;

– теоретические основы анализа, синтеза, интеллектуализации, повышения эффективности, оптимизации и применения информационно-измерительных систем, ориентированных на различные предметные области, а также компьютеризованных систем диагностирования и контроля параметров процессов и сред.

Объектом исследования выбраны процессы определения эффекта Коанда с помощью компьютерных систем при эксплуатации азимутальной винто-рулевой колонки.

Предметом исследования являются модели, методы и средства создания компьютерной системы определения эффекта Коанда

2. Целью исследования является повышение безопасности эксплуатации судов торгового и военно-морского флотов путем уменьшения аварийной эксплуатации азимутальной винто-рулевой колонки за счет разработки методов и средств создания компьютерной системы определения эффекта Коанда.

3. Главная задача диссертационного исследования заключается в разработке метода определения начала (начального момента) отклонения судового валопровода под действием внешней силы.

4. Решение главной задачи диссертационного исследования выполнено на основе синтеза результатов вспомогательных задач. На базе системного подхода замкнутый цикл научного исследования представлен в виде технологической карты исследования.

## ГЛАВА 2

### РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧЕК РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ

#### **2.1. Выбор метода исследования прочностных характеристик азимутального гребного движителя**

При разработке новых моделей или исследовании уже существующих АВРК важную роль играет определение их технико-эксплуатационных характеристик. Поэтому, любое исследование должно сводиться к поиску режимных и конструктивных характеристик объекта исследования на основании анализа протекающих в объекте процессов, описание которых осуществляется на основе их кинетических закономерностей.

Для этого можно провести комплекс испытаний, предназначенных для определения способности исследуемых конструкций выдерживать проектные нагрузки и бесперебойно функционировать при расчетных условиях эксплуатации. Но такой подход требует значительного времени и больших финансовых затрат, что при конструировании новых моделей АВРК может значительно превышать расчетный бюджет проекта.

В силу большой сложности конструкции АВРК построение относительно простой математической модели и вывода из неё точных численных показателей также не представляется возможным.

Наиболее оптимальным и малозатратным выходом из сложившейся ситуации является параметрическое моделирование (параметризация) — моделирование (проектирование) с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время «проиграть» (с помощью изменения параметров или геометрических соотношений) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок. Параметрическое

моделирование существенно отличается от обычного двумерного черчения или трёхмерного моделирования. Конструктор в случае параметрического проектирования создаёт математическую модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т.п.

В современном проектировании широко используются различные программные пакеты автоматизированного конструирования (Computer-aided engineering-CAE), позволяющие проводить инженерный анализ компьютерных моделей не прибегая к реальным экспериментам.

Исходя из рассмотренных моделей и конструкций азимутальных гребных установок и свойств управления наиболее оптимальной средой для построения компьютерной модели, дальнейшего исследования и проведения симуляций статических нагрузок является Dassault Systemes SolidWorks.

Семейство расчётных модулей SolidWorks Simulation выполняет прочностные статические и динамические исследования (линейные и нелинейные) на основе метода конечных элементов (МКЭ). Создание исследований и выполнение расчётов происходит непосредственно в среде программного комплекса SolidWorks на основе собственных моделей SolidWorks или же деталей и сборок произвольной импортированной геометрии.

Метод конечных элементов (МКЭ) — это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики [46]. Метод широко используется для решения задач механики. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов модели). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на

границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает её решение. Размер элементов можно менять, уменьшая его вблизи интересующей области, и увеличивая – для снижения затрат процессорного времени (рис. 2.1). Метод конечных элементов сложнее метода конечных разностей в реализации. У МКЭ, однако, есть ряд преимуществ, проявляющихся на реальных задачах: произвольная форма обрабатываемой области; сетку можно сделать более редкой в тех местах, где особая точность не нужна.



Рис. 2.1. Модель, поделенная на элементы методом конечных элементов



Долгое время широкому распространению МКЭ мешало отсутствие алгоритмов автоматического разбиения области на «почти равносторонние» треугольники (погрешность, в зависимости от вариации метода, обратно пропорциональна синусу или самого острого, или самого тупого угла в разбиении). Впрочем, эту задачу удалось успешно решить триангуляцией Делоне, что дало возможность создавать полностью автоматические конечноэлементные САПР наподобие SolidWorks или Autodesk Inventor, в которых используется параметрическое моделирование.

Параметрическое моделирование (параметризация) – моделирование (проектирование) с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время «проиграть» (с помощью изменения параметров или геометрических соотношений) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок. Параметрическое моделирование существенно отличается от обычного двумерного черчения или трёхмерного моделирования. Конструктор в случае параметрического проектирования создаёт математическую модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т.п.

## **2.2. Математическая модель определения прочностных характеристик азимутального гребного движителя**

В реальных конструкциях почти всегда присутствуют сложные формы, состоящие к тому же из различных материалов. Метод конечных элементов является наиболее популярным численным методом решения задач проектирования конструкций сложных форм.

Прочностные расчеты сопровождаются расчетами напряжений, при которых твердое тело с помощью булевых операций можно разбить на

ячейки сетки. Такие ячейки называют конечными элементами.

Конечные элементы могут иметь различную форму. В отличие от реального сооружения в дискретной модели конечные элементы связываются между собой только в отдельных точках (узлах) определенным конечным числом узловых параметров.

Конечные элементы могут описываться одной, двумя или тремя пространственными координатами в зависимости от размерности задачи, для решения которой они предназначены. Соответствующее число внутренних или локальных координат называется собственной размерностью элемента. В динамическом анализе время рассматривается как дополнительная размерность.

Для исследования модели азимутального гребного движителя наиболее подходящими будут трехмерные конечные элементы – тетраэдр и параллелепипед (Рис. 2.2 а и б). В обоих случаях линейные элементы ограничены прямолинейными сторонами (плоскостями), тогда как элементы более высокого порядка могут иметь в качестве границ криволинейные поверхности. В частном случае также возможно разбиение на элементы, подобные двумерному треугольнику (Рис. 2.2. в), которые позволяют еще учесть изменение неизвестной величины вдоль третьей координаты.

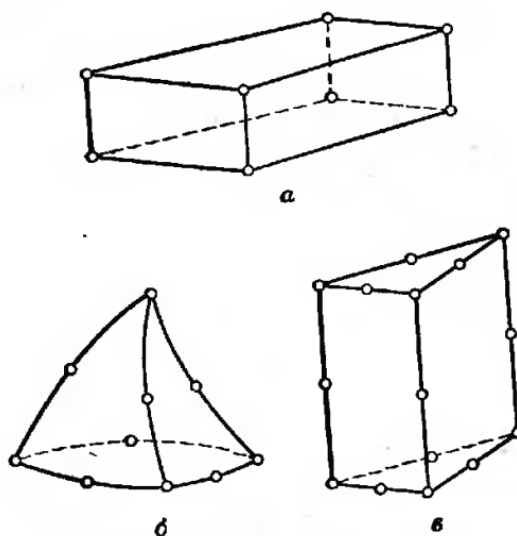


Рис. 2.2. Модели трехмерных конечных элементов

По способу получения основных, т. е. разрешающих, уравнений различают четыре основных вида метода конечных элементов: прямой, вариационный, взвешенных невязок и энергетического баланса. Из приведенных видов МКЭ для исследования прочностных характеристик наиболее оптимальный – вариационный метод.

Вариационный метод основан на принципах стационарности некоторой переменной (функционал), зависящей от одной или нескольких. Применительно к механике деформируемого твердого тела эта переменная представляет собой потенциальную (функционал Лагранжа) или дополнительную (функционал Кастилиано) энергию системы или формируется на основе этих двух энергий (функционалы Хеллингера-Рейсснера, Ху-Вашицу). Если в функционал подставить аппроксимирующие выражения искомых функций и применить к нему экстремальные принципы (соответственно принцип Лагранжа, принцип Кастилиано и т. д.), получим систему алгебраических уравнений, решением которой будут значения узловых неизвестных.

Вариационный принцип Лагранжа: Потенциальная энергия приобретает стационарные значения на тех кинематически возможных перемещениях, которые удовлетворяют заданным граничным условиям и условиям равновесия сил.

В отличие от прямого, вариационный метод может одинаково успешно применяться как к простым, так и сложным задачам.

Расчет рабочего напряжения (прочности) основан на использовании коэффициентов жесткости, устанавливающих перемещение узлов нагруженной сетки, что позволяет определять напряжение в каждом элементе.

Рассмотрим трехмерный объект произвольной формы, находящийся в равновесном состоянии под воздействием некоторой нагрузки (рис. 2.3). Силы трения, действующие на поверхность (Поверхностные силы), обозначим –  $p$ , массовые силы (объемные силы) –  $G$ . В общем случае эти

силы раскладываются на компоненты, параллельные осям координат:

$$G = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Обозначим смещение произвольной точки объекта  $(X, Y, Z)$  по сравнению с конфигурацией в отсутствие нагрузки символом  $U$ . Тогда

$$U^T = [U(X, Y, Z) \quad V(X, Y, Z) \quad W(X, Y, Z)]. \quad (2.2)$$

Смещения  $U$  приведут к возникновению деформации

$$\varepsilon^T = [\varepsilon_{XX} \quad \varepsilon_{YY} \quad \varepsilon_{ZZ} \quad \varepsilon_{XY} \quad \varepsilon_{YZ} \quad \varepsilon_{ZX}] \quad (2.3)$$

и соответствующих напряжений

$$\sigma^T = [\sigma_X \quad \sigma_Y \quad \sigma_Z \quad \tau_{XY} \quad \tau_{YZ} \quad \tau_{ZX}]. \quad (2.4)$$

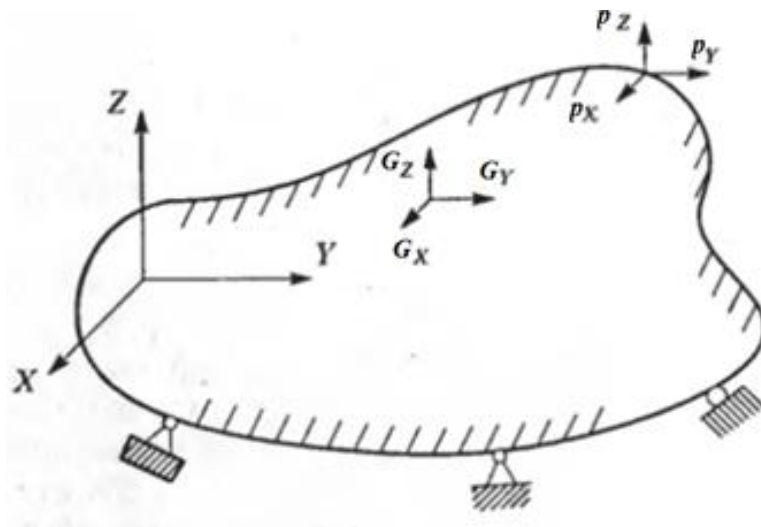


Рис. 2.3. Трехмерный объект с внешними силами

Необходимо рассчитать  $U$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  в точке  $(X, Y, Z)$  по заданным внешним силам. Выражение для полной потенциальной энергии упругого тела описывается выражением:

$$\Pi = \mathcal{E} - A = \frac{1}{2} \int_V \bar{\varepsilon}^T \sigma dV - \int_V \bar{U}^T G dV - \int_S \bar{U}^S{}^T p dS, \quad (2.5)$$

где  $\mathcal{E}$  – энергия деформации;

$A$  – работа приложенных массовых и поверхностных сил.

Три последних слагаемых уравнения (2.5) описывают внешнюю работу, выполняемую реальными силами  $G$ ,  $p$  на виртуальных перемещениях  $\bar{U}$ .

Верхний индекс  $S$  у вектора  $\bar{U}$  означает виртуальное смещение на поверхности. Напряжения вычисляются через деформации по соответствующим материальным уравнениям.

Получим из уравнения (2.5) уравнения метода конечных элементов. Начнем с аппроксимации объекта, изображенного на рис. 2.3, сеткой конечных элементов. Элементы соединяются друг с другом в узловых точках, которые находятся на их границах. Смещение в любой точке с координатами  $(x, y, z)$  в локальной системе координат элемента считается функцией смещений в узловых точках.

То есть для элемента  $m$  высказывается предположение, что

$$u^{(m)}(x, y, z) = H^{(m)}(x, y, z) \bar{U}, \quad (2.6)$$

где  $H$  – интерполяционная матрица смещений (функций формы);

$\bar{U}$  – вектор смещений на всех узлах.

Если общее количество узлов равно  $N$  вектор  $\bar{U}$  запишется следующим образом:

$$\bar{U}^T = \begin{bmatrix} u_1 v_1 w_1 & u_2 v_2 w_2 & \dots & u_N v_N w_N \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Выражение (2.7) можно переписать так:

$$\bar{U}^T = \begin{bmatrix} U_1 & U_2 & \dots & U_N \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Хотя в уравнении (2.8) перечисляются смещения всех узлов, а, следовательно, эти смещения входят и в выражение (2.6), для каждого конкретного элемента смещения внутри него определяются только смещениями в его собственных узлах. В уравнение (2.6) все узлы вошли потому, что это облегчает процесс объединения матриц отдельных элементов в матрицу структуры в целом, как будет показано ниже.

Уравнение (2.6) позволяет вычислить деформации:

$$\varepsilon^{(m)}(x, y, z) = B^{(m)}(x, y, z)\bar{U}. \quad (2.9)$$

Строки матрицы деформаций-смещений  $B^{(m)}$  из уравнения (2.9) получаются дифференцированием и объединением строк матрицы  $H^{(m)}$ .

Теперь мы можем записать и выражения для напряжений внутри каждого элемента:

$$\sigma^{(m)} = C^{(m)}\varepsilon^{(m)} + \sigma_0^{(m)}, \quad (2.10)$$

где  $C$  – матрица упругости элемента  $m$  (матрица Гука),

$\sigma_0^{(m)}$  – начальное напряжение внутри элемента.

В структуре, состоящей из разных материалов, для каждого элемента можно задать свою собственную матрицу упругости.

Перепишем уравнение (2.5) в виде суммы интегралов по объемам и поверхностям отдельных элементов:

$$\begin{aligned} \Pi = \sum_m \Pi^{(m)} = & \frac{1}{2} \sum_m \int_{V^{(m)}} \overline{\varepsilon^{(m)}}^T \sigma^{(m)} dV^{(m)} - \\ & - \sum_m \int_{V^{(m)}} \overline{u^{(m)}}^T G^{(m)} dV^{(m)} - \sum_m \int_{S^m} \overline{u^{S(m)}}^T p^{(m)} dS^{(m)}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где  $m$  изменяется от 1 до полного количества элементов в системе.

Подстановка (2.6), (2.9) и (2.10) в (2.11) даст следующее выражение:

$$\begin{aligned}
\sum_m \Pi^{(m)} &= \frac{1}{2} \sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)T} \bar{U}^T C^{(m)} B^{(m)} \bar{U} dV^{(m)} - \\
&- \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} \bar{U}^T G^{(m)} dV^{(m)} - \sum_m \int_{S^m} H^{S(m)T} \bar{U}^T p^{(m)} dS^{(m)} + \\
&+ \sum_m \int_{V^{(m)}} \sigma_0^{(m)} B^{(m)T} \bar{U}^T dV^{(m)},
\end{aligned} \tag{2.12}$$

где поверхностные интерполяционные матрицы смещений  $H^{S(m)}$  получаются из объемных интерполяционных матриц смещений  $H^{(m)}$  подстановкой координат поверхности элемента.

Обозначим:

$$K = \sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)T} C^{(m)} B^{(m)} dV^{(m)}; \tag{2.13}$$

$$R = R_B + R_S - R_0; \tag{2.14}$$

$$R_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} G^{(m)} dV^{(m)}; \tag{2.15}$$

$$R_S = \sum_m \int_{S^m} H^{S(m)T} p^{(m)} dS^{(m)}; \tag{2.16}$$

$$R_0 = \sum_m \int_{V^{(m)}} \sigma_0^{(m)} B^{(m)T} dV^{(m)}. \tag{2.17}$$

Минимизация энергии  $\Pi$  приводит к уравнению:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial U} = \frac{\partial}{\partial U} \sum_m \Pi^{(m)} = 0 \tag{2.18}$$

которое с учетом введенных обозначений запишется так:

$$KU = R. \tag{2.19}$$

Суммирование интегралов по объемам отдельных элементов в формуле (2.14) выражает тот факт, что матрица жесткости набора элементов как целого получается сложением матриц жесткости элементов  $K^{(m)}$ . Аналогичным образом, вектор  $R_B$  объемной силы, действующей на все тело, получается суммированием векторов объемных сил, действующих на отдельные элементы. Тем же путем вычисляются и векторы прочих сил.

Выражение (2.19) описывает статическое равновесие. Если приложенные силы изменяются во времени, это выражение применимо к любому конкретному моменту. Однако при быстром приложении нагрузки необходимо учитывать силы инерции. По принципу Даламбера силы инерции отдельных элементов могут быть добавлены к массовым силам. Если предположить, что ускорение в любой точке элемента связано с ускорениями в узловых точках матрицей  $H^{(m)}$  подобно смещениям, вклад массовых сил в вектор нагрузки  $K$  будет выражаться так:

$$R_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} \left[ G^{(m)} - \rho^{(m)} H^{(m)} \ddot{U} \right] dV^{(m)}, \quad (2.20)$$

где  $\ddot{U}$  – ускорения узловых точек;

$\rho^{(m)}$  – массовая плотность элемента  $m$ .

Подстановка (2.20) вместо (2.15) в (2.19) дает новое уравнение равновесия:

$$M \ddot{U} + KU = R, \quad (2.21)$$

где  $M$  – матрица масс.

В уравнении (2.21)  $U$  и  $R$  являются функциями времени.

Демпфирующие силы могут быть учтены как дополнительный вклад в массовые силы, что позволяет описать эффект демпфирования (затухания). Уравнение (2.20) при этом принимает новый вид:



$$R_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} \left[ G^{(m)} - \rho^{(m)} H^{(m)} \ddot{U} - k^{(m)} H^{(m)} \dot{U} \right] dV^{(m)}, \quad (2.22)$$

где  $\dot{U}$  – вектор скоростей узловых точек;

$k^{(m)}$  – демпфирующий коэффициент для элемента  $m$ .

Уравнение равновесия приобретает вид

$$M \ddot{U} + C \dot{U} + KU = R, \quad (2.23)$$

где  $C$  – матрица демпфирования.

На практике матрицу  $C$  обычно конструируют из массовой матрицы и матрицы жесткости на основании экспериментальных данных по демпфированию в материале, потому что определить параметры демпфирования отдельных элементов достаточно сложно.

Последующим этапом исследования должно быть использование описанной математической модели при компьютерном моделировании.

### 2.3. Исследование модели АВРК

Стресс анализ подсчитывает перемещения, деформации и напряжения в элементах рассматриваемой модели. Материал, из которой состоит модель, теряет свои свойства, когда напряжение достигает определенного уровня. Различные материалы теряют свои свойства на разных уровнях напряжения (рис. 2.2). SolidWorks SimulationXpress использует линейный статический анализ, на основе метода конечных элементов, чтобы вычислить напряжения. Линейный статический анализ делает несколько предположений для расчета напряжений в детали.

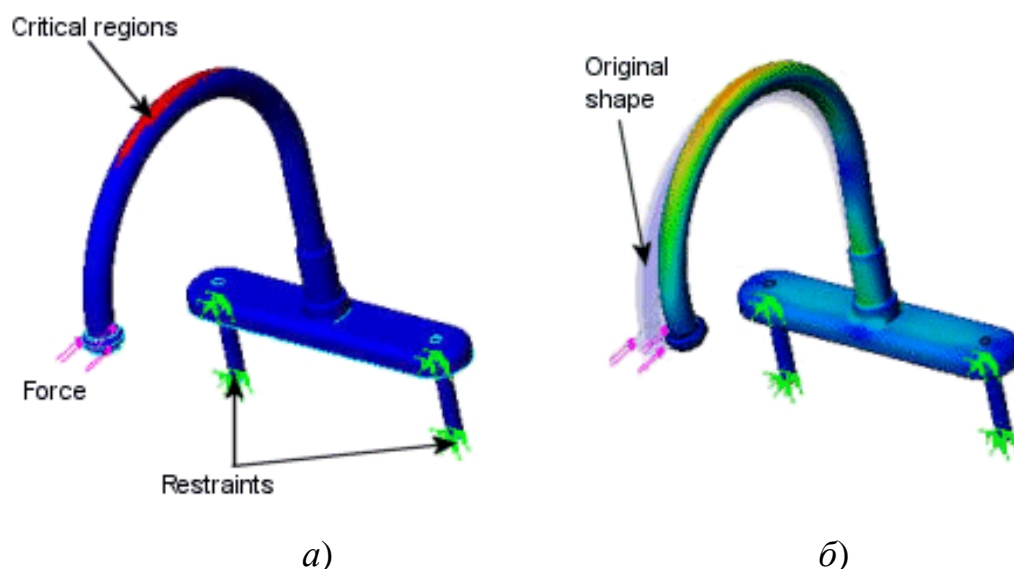


Рис. 2.2. Пример исследуемой модели с точками приложения: *а)* – приложенным усилием и критическим регионом; *б)* – после нанесения нагрузки

Без инструментов моделирования, на вопросы механической нагрузки можно ответить только в дорогих и трудоемких циклах разработки продукта, которые обычно включают в себя следующие этапы:

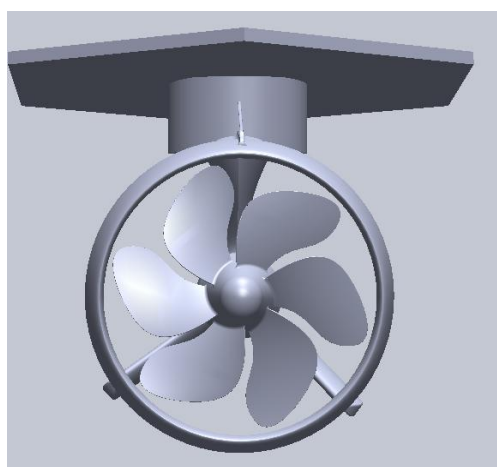
- создание модели в САПР;
- прототип дизайна;
- испытание опытного образца в этой области;
- оценка результатов полевых испытаний;
- изменение дизайн, основанный на результатах полевых испытаний.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока удовлетворительного решения не достигнуто. Моделирование может помочь выполнить следующие задачи:

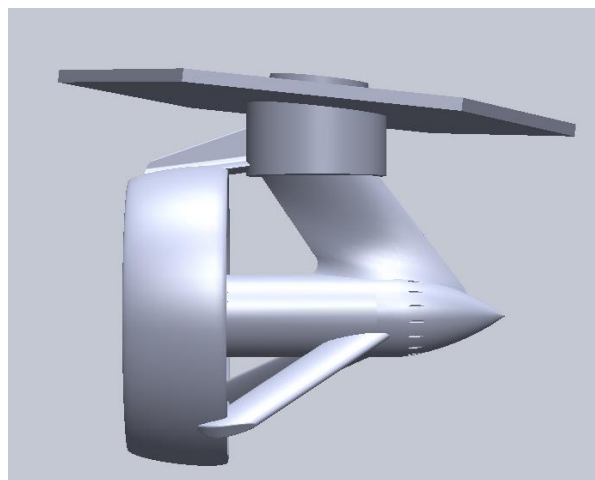
- снижение затрат на тестирование модели с помощью компьютера, а не полевых испытаний;
- сокращение времени выхода на рынок за счет сокращения количества циклов разработки продукта или исследования соответствующей насущной проблемы;
- оптимизация конструкции путем имитации концепции и сценарии

до принятия окончательного решения.

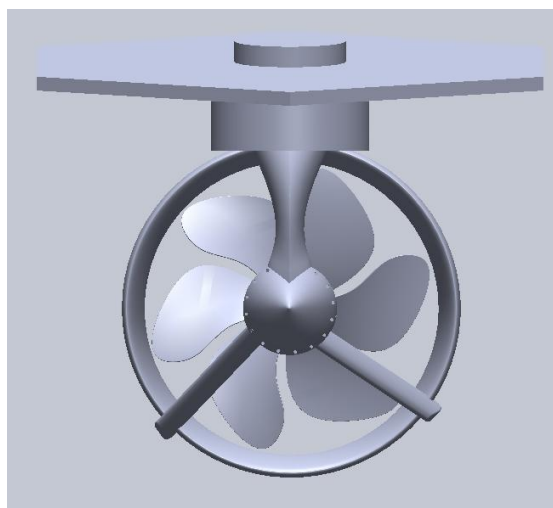
Пример выбранной модели представлен на рис. 2.3.



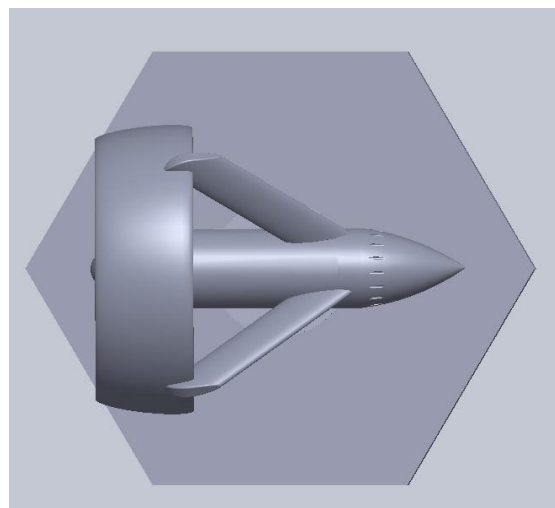
*а)*



*б)*



*в)*



*г)*

Рис. 2.3. Модель Азипода:

*а)* – вид спереди; *б)* – вид сбоку; *в)* – вид сзади; *г)* – вид снизу

Для получения результата симуляции используется следующий набор действий:

- выбор типа нагрузки;
- установка параметров нагрузки;
- выбор значения и направления гравитации;
- определение толщины деталей модели и материала;

- выбор точек фиксации;
- выбор величины и места приложения нагрузки;
- разбивка модели на конечные элементы;
- симуляция;
- оценка результатов симуляции.

Исходя из задачи выбираем тип нагрузки статический (Static) и выставляем соответствующие параметры.

Устанавливаем гравитацию. В качестве исходной гравитации берем естественную природную гравитацию, направленную вниз (рис. 2.4).

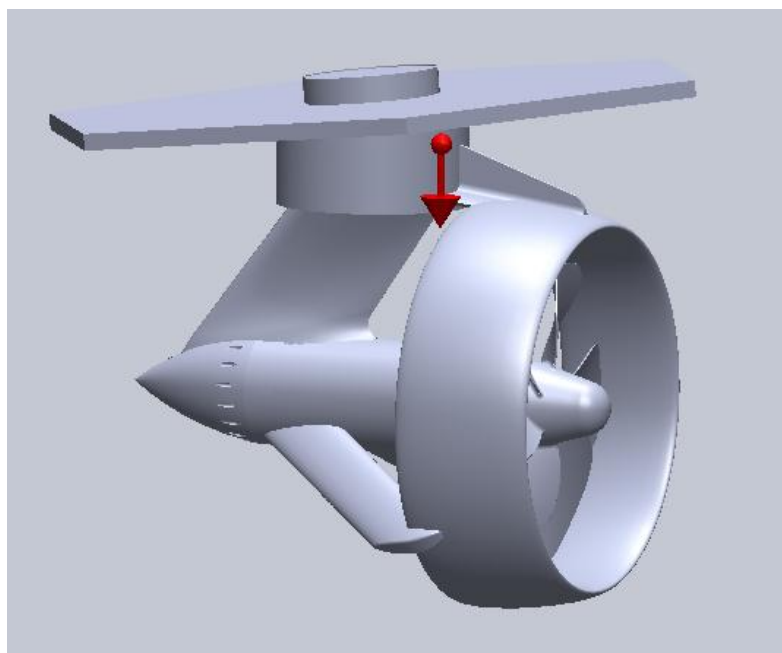


Рис. 2.4. Исследуемая модель с приложенной гравитацией

После введения параметров и выбора направления гравитации выберем материал для элементов модели. Исходя из документации выберем в качестве материала стандартный материал под названием Легированная Сталь (Alloy Steel) со свойствами, приведенными в табл. 2.1.

Таблица 2.1

## Свойства материала модели

Модуль продольной упругости (Elastic Modulus)	2.1e+11 Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона (Poissons Ratio)	0.28
Модуль сдвига (Shear Modulus)	7.9e+10 Н/м <sup>2</sup>
Плотность (Density)	7700 кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности (Tensile Strength)	723825600 Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести (Yield Strength)	620422000 Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения (Thermal Expansion Coefficient)	1.3e-5 1/К
Температуропроводность (Thermal Conductivity)	50 Вт/м*К
Теплоемкость (Specific Heat)	460 Дж/кг*К

После определения материала элементов модели определим геометрические точки крепления (Fixtures). В качестве поверхности крепления выбираем верхнюю панель азипода (рис. 2.5).

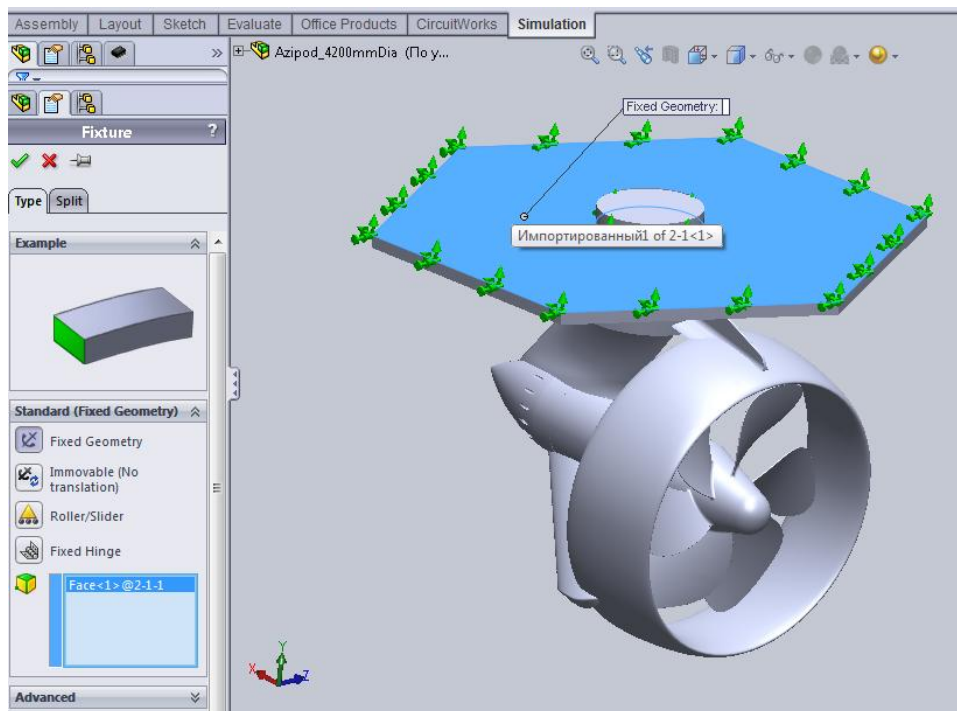


Рис. 2.5. Поверхность крепления

После закрепления модели приложим усилие. Исходя из рассмотренных ранее исследований предположим, что усилие направлено вверх на вал. После этого нанесем на модель толщины деталей. Исходя из документации выберем 300 миллиметров.

Для совершения симуляция необходимо разбить модель на конечные элементы методом конечных элементов. Т.е. построить сетку модели (Mesh), что собственно и совершено. Было выбрано величина элемента равная 1000 квадратных миллиметров, что является оптимальным для данной задачи (рис. 2.6). Улучшение модели приведет к излишне тяжелой нагрузке на вычислительные ресурсы и краху симуляции. Ухудшение качества модели совершит более значимую погрешность в точке стресса.

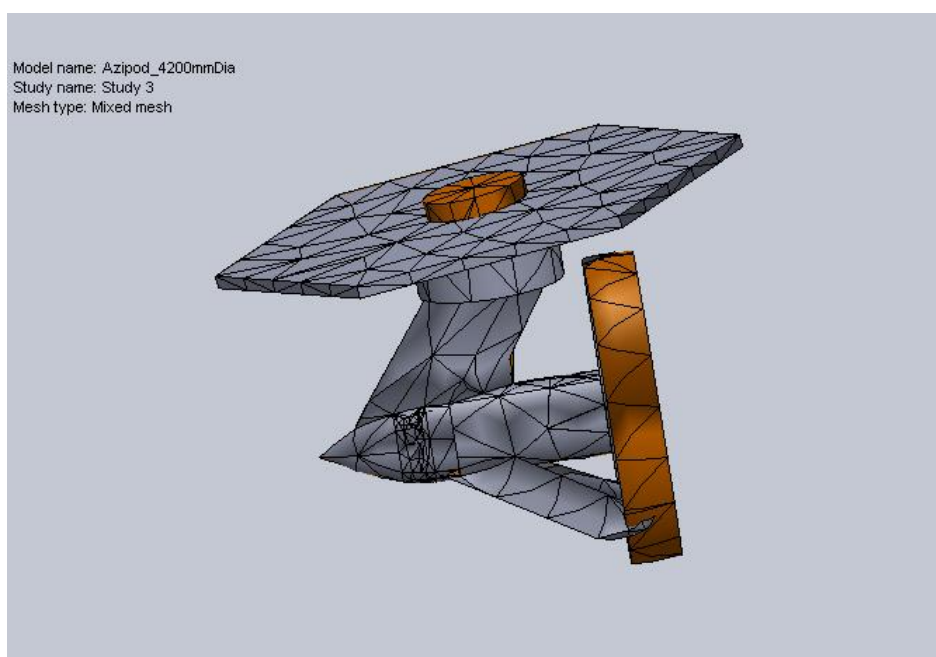


Рис. 2.6. Полученная сетка модели методом конечных элементов

В результате проведенной симуляции при усилнии  $1000 \text{ Н/м}^2$  получена максимально стрессовое отклонение с величиной  $0.00373058$  метров.

Для проведения статической симуляции был осуществлен алгоритм действий, состоящий из нанесения гравитации, выбора толщины материала и собственно материала элементов модели, выбора геометрических точек крепления, выбора места, вектора и величины нанесения механической

нагрузки. После разбиения на сетку методом конечных элементов и проведения статической симуляции получили пространственный график нагрузок (рис. 2.7), позволяющий определить, как минимум 4 точки для внедрения датчиков напряжения (рис. 2.8).

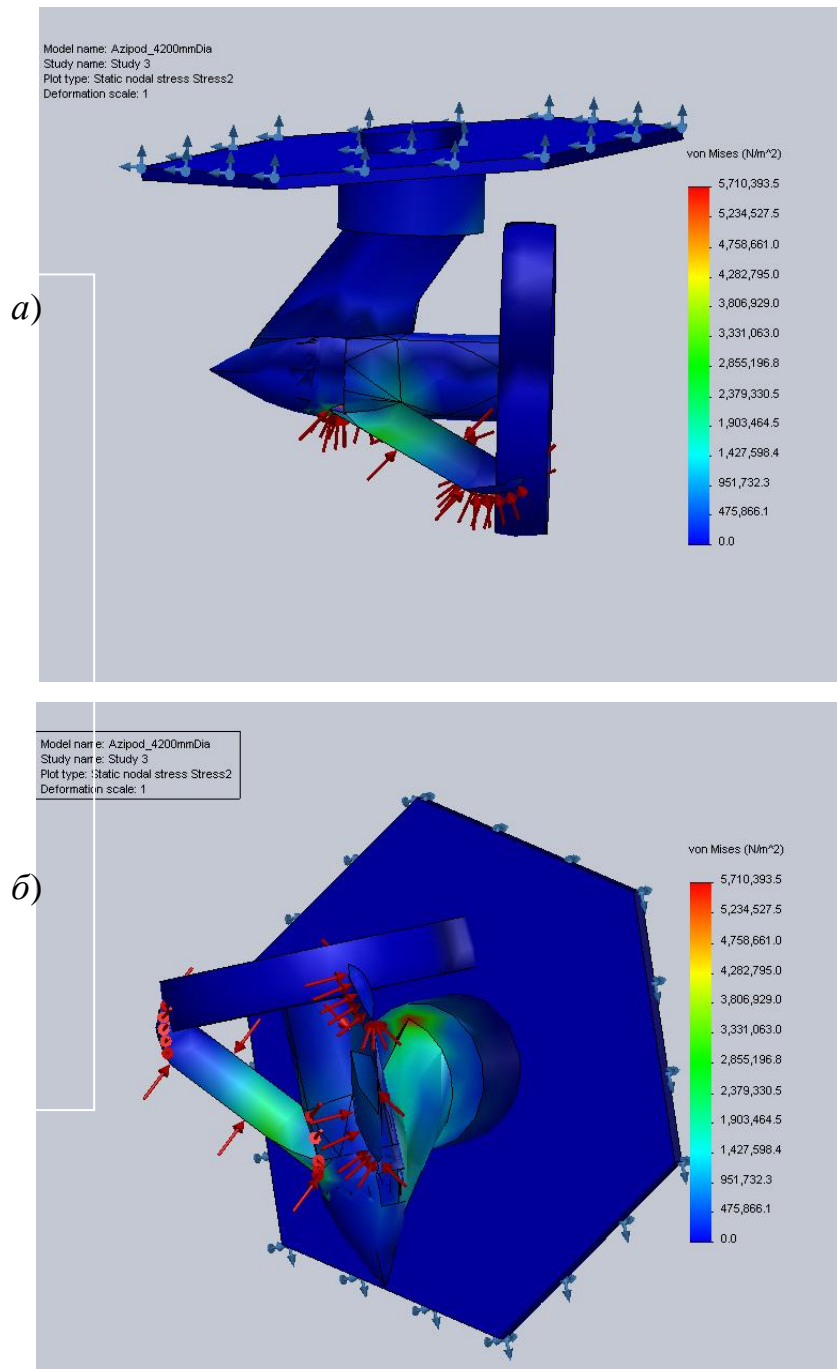


Рис. 2.7. Результаты деформации: а) – вид сбоку; б) – вид снизу



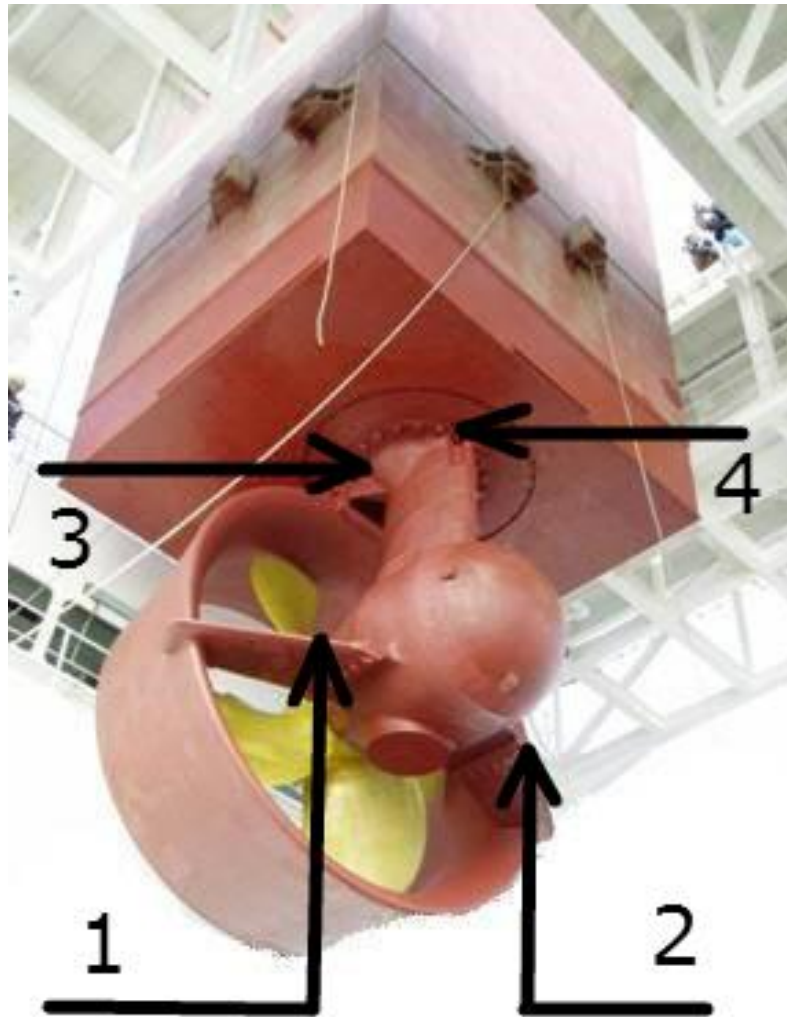


Рис. 2.8. Указание места расположения четырех датчиков определения напряжения

#### **2.4. Определение возможных типов датчиков, используемых системой**

Существует несколько типов датчиков, которые могут быть использованы для определения механического напряжения. Проанализируем наиболее подходящие и часто используемые типы датчиков, а именно: резистивные, тензометрические, оптические и пьезоэлектрические.



2.4.1. Резистивные измерительные преобразователи (РИП). Физические принципы построения РИП состоят в управлении переменным сопротивлением путем оказания на него механического воздействия и регистрации изменения тока, которое происходит в результате этого воздействия [47].

Электрическое сопротивление является наиболее распространенным параметром измерительных цепей различных ИП. В цепях с сосредоточенными параметрами электрическое сопротивление воспроизводится в виде конструктивно оформленного элемента – резистора. Резистор состоит из изоляционного каркаса, на который нанесен чувствительный элемент в виде проволоки или тонкого слоя токопроводящего материала, обладающего определенным электрическим сопротивлением.

Основными характеристиками являются: номинальное сопротивление  $R_{ном}$ , допустимая погрешность  $\delta$  и допустимая временная нестабильность  $\gamma$ .

Допустимая погрешность показывает, на сколько процентов отличаются друг от друга резисторы одного номинала. Такое различие получается в результате несовершенства технологии изготовления резисторов,  $\delta$  показывает максимальную величину разброса.

Временная нестабильность – параметр, характеризующий свойство резисторов стареть, т.е. изменять свой номинал в процессе эксплуатации.

Собственные шумы – генерация напряжения, происходящая за счет теплового движения частиц в веществе, из которого изготовлен токопроводящий элемент сопротивления. Собственные шумы резистора складываются из тепловых шумов, уровень которых определяется значением напряжения тепловых шумов:

$$U_m = \sqrt{4k\Theta R\Delta f},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

$\Theta$  – абсолютная температура;

$R$  – сопротивление резистора;

$\Delta f$  – рабочая полоса частот.

Таким образом, низкая чувствительность, большой разброс параметров, который требует специальной калибровки, временная и температурная нестабильность являются существенными недостатками резистивных датчиков, что делает их не очень желательными в качестве определителей появления эффекта Коанда.

2.4.2. Тензометрические датчики. Тензометры являются разновидностью переменных резисторов. Их особенность состоит в изменении сопротивления, возникающего за счет изменения физических свойств. Тензорезисторы – бесконтактные переменные сопротивления.

Тензометры чаще всего приклеиваются на измеряемую поверхность. При прогибе измеряемой поверхности тензометр в свою очередь изменяет свою длину  $l$  и прогибается на величину  $\Delta$ . Изменение длины проволоки приводит к изменению сопротивления.

Сопротивление проводника связано с удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  материала, длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  этого проводника зависимостью:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Легко убедиться, что величина изменения сопротивления тензорезистора пропорциональна деформации:

$$\Delta R = R_0 \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{1 - \Delta l_0}} \right),$$

где  $l_0$  – начальная длина;  $\Delta l$  – удлинение (либо положительное, либо отрицательное).

Тензометры характеризуются коэффициентом тензочувствительности – отношением относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины тензорезистора:

$$K_m = \frac{\Delta R R_0}{\Delta l_0}.$$

Коэффициент тензочувствительности является физической характеристикой тензометров. Проволочные тензорезисторы имеют  $K_\phi \approx 2$ ; полупроводниковые (n- или p-проводимости) –  $K_\phi \approx 100$ ; полупроводниковые тензорезисторы (p-n-p или n-p-n перехода) –  $K_\phi \approx 10^3$ ; тензорезисторы на базе p-n или n-p переходов в полупроводниках, например, в арсениде галлия –  $K_\phi \approx 10^4$ ; в монокристалле сульфида свинца –  $K_\phi \approx 10^5$ ; в поликристалле сульфида свинца –  $K_\phi \approx 10^6$ .

В общем случае коэффициент тензочувствительности проводника содержит составляющую, которая определяется изменением его удельного электрического сопротивления и может быть как положительной, так и отрицательной величиной.

Значение  $K_\phi$  полупроводниковых тензорезисторов в значительной мере зависит от степени деформации, температуры, удельного электрического сопротивления, типа проводимости.

В зависимости от материала чувствительного элемента тензорезисторы подразделяются на проволочные, фольговые, пленочные и полупроводниковые.

К достоинствам тензорезисторов можно отнести:

- малую массу;
- небольшие габариты;
- простоту конструкции;
- невысокую стоимость;
- возможность измерения статических и динамических процессов.

Недостатки тензорезисторов:

- невысокая чувствительность (необходимо применять усилители);
- сильное влияние окружающей температуры;
- возможность использования только в пределах упругих деформаций;
- необходимость влагозащиты;
- возможность только разового использования (разрушается при отсоединении от детали).

Несмотря на то, что данный тип датчиков является предпочтительным по сравнению с резистивными датчиками, указанные выше недостатки также не дают ему возможности быть эффективным в качестве определителей эффекта Коанда.

2.4.3. Оптические датчики. Оптические датчики это оптоволоконные устройства для детектирования некоторых величин, обычно температуры или механического напряжения (а также смещения, вибраций, давления, ускорения, вращения). Общий принцип таких устройств в том, что свет от лазера передается через оптическое волокно, испытывая слабое изменение своих параметров в волокне или в одной или нескольких брэгговских решетках, и затем достигает схемы детектирования, которая оценивает эти изменения.

В состав оптического датчика, как правило, входят три компонента: источник света, фотодетектор и устройства, управляющие светом (линзы, зеркала, оптические волокна и т.д.).

В сравнении с другими типами датчиков, волокно-оптические датчики обладают следующими преимуществами:

- состоят из электрически непроводящих материалов, что позволяет использовать их, например, в местах с высоким напряжением;
- безопасно использовать во взрывоопасной среде, т.к. нет риска возникновения электрической искры;
- не подвержены электромагнитным помехам и сами по себе не электризуют другие устройства;

- материалы могут быть химически инертны, т.е. не загрязняют окружающую среду, и не подвержены коррозии;
- имеют очень широкий диапазон рабочих температур.

Недостатками оптических датчиков являются:

- техническая сложность электронно-оптических компонентов;
- относительно высокая цена;
- при неблагоприятных условиях (пыль, влажность, масляная пленка на линзах), низкая надежность, влияние посторонних засветок, требования к свойствам поверхности объекта.

Несмотря на преимущество оптических датчиков по сравнению с резистивными и тензометрическими, указанные недостатки также показывают не высокую их эффективность при использовании в качестве датчиков в компьютерных системах определения эффекта Коанда.

2.4.4. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭ). Пьезоэлемент является преобразователем механической энергии в электрическую (в режиме прямого пьезоэффекта). Следует при этом иметь в виду, что главной действующей физической величиной при таком преобразовании является сила, прилагаемая к пьезоэлементу. Так как назначение пьезокерамических сенсоров весьма велико, на ПЭ могут действовать равные силы: сосредоточенные и равномерно распределенные, асимметричные по отношению к разным поверхностям ПЭ и симметричные. Эти силы могут быть импульсными и экспоненциальными, в виде затухающих гармонических колебаний и другие. В каждом конкретном случае физическая модель ПЭ сенсора способна видоизменяться.

Существует множество типов и видов ПЭ. Большой класс пьезопреобразователей можно классифицировать по следующим признакам:

- а) по применяемому материалу (монокристаллический кварц или ниобат лития; керамика);

б) по типу колебаний (радиальные; изгибные; крутильные; сдвиговые и др.);

в) по типу пьезоэффекта (прямого пьезоэффекта обратного пьезоэффекта, одновременно прямого и обратного пьезоэффектов);

д) по количеству пьезоэлементов (моноэлементные; биморфные: симметричные, асимметричные; триморфные: планарные и компланарные и т.п.);

е) по назначению (для измерения динамических и статических давлений и усилий, ускорений, параметров вибраций, параметров удара; звукового давления и многих других).

Данная классификация далеко не полная.

Погрешности ПЭ определяются, в основном, нестабильностью пьезомодулей или коэффициента электромеханической связи под действием дестабилизирующих факторов. Одним из методов борьбы с этим является применение для их изготовления монокристаллических материалов, в частности, кварца. Их достоинствами являются высокая твердость, нерастворимость в воде, устойчивость к действию ряда кислот, малое тепловое расширение, чрезвычайно высокая добротность ( $10^5$ - $10^6$ ) и стабильность ( $10^{-3}$ - $10^{-5}\%$ ).

Однако коэффициент электромеханической связи примерно на порядок, а значения пьезомодулей – почти на два порядка меньше, чем эти же параметры у керамики. Кроме того, недостатками кварца являются малая диэлектрическая проницаемость и собственная емкость кварцевых пластинок. Также важным фактором является высокая стоимость и сложная технология изготовления.

Пьезокерамика обладает многими достоинствами. Технология ее производства проста, а значит, ниже стоимость преобразователей на ее основе. ПЭ имеют высокую радиационную стойкость. ПЭ стойки к действию различных агрессивных сред.

Недостатком керамики, по сравнению с кварцем – низкое значение точки Кюри  $T_K$ , однако уже сегодня созданы этот факт не является критичным в рассматриваемой области применения ПЭ.

Таким образом, анализируя все четыре типа датчиков, наиболее подходящими для использования в компьютерных системах определения эффекта Коанда являются пьезокерамические датчики.

Далее необходимо выбрать тип наиболее подходящего пьезоэлемента: одноморфный, биморфный, триморфный и т.д.

Одноморфные ПЭ наиболее распространены, однако они имеют меньшую чувствительность по сравнению с полиморфными ПЭ. В свою очередь, среди полиморфных элементов, т.е. состоящих из двух и более компонент, наиболее часто используют различные типы биморфных и триморфных элементов (рис. 2.9).

Биморфные пьезоэлементы состоят из двух компонент – двух пьезоэлементов или пьезоэлемента и металлической пластины, соединенных с помощью эпоксидного компаунда или легкоплавкого припоя.

Биморфные элементы состоящие из двух ПЭ названы симметричными (рис.2.9, а) – симметрия относительно нейтральной плоскости при его изгибе. Биморфные элементы, состоящие из ПЭ и металлической пластины называются асимметричными (рис.2.9, б).

Соединение пьезоэлектрической и металлической пластин в асимметричный биморф приводит к увеличению чувствительности в 10-20 раз, что делает его предпочтительным для использования. При этом резонансная частота уходит в область низких частот. Так, например, пьезоэлемент диаметром 30 и толщиной 0,3 мм из пьезокерамики ЦТС-19 имеет минимальную резонансную частоту около 70 кГц, соединение двух таких пьезоэлементов в симметричный биморф приводит к появлению резонансных частот примерно 2,5 и 3,45 кГц.

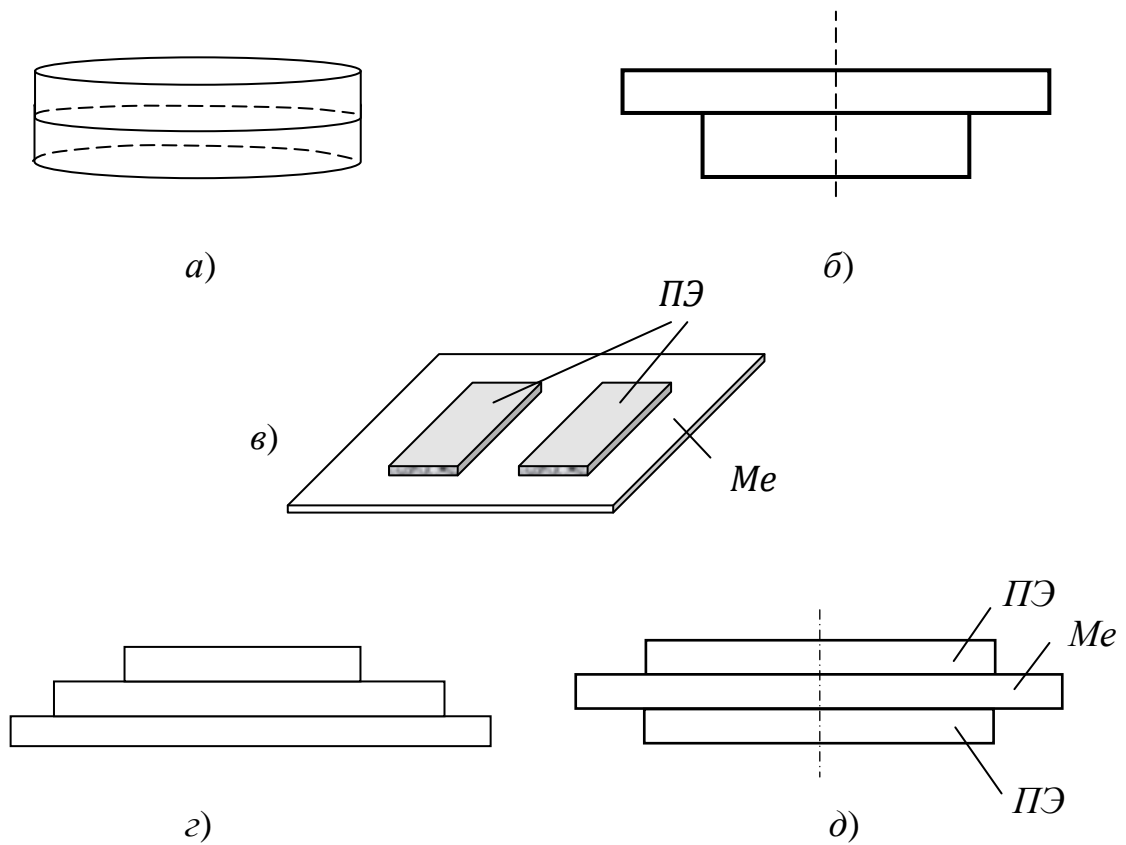


Рис. 2.9. Типы полиморфных пьезоэлементов: *а* – биморфный симметричный, *б* – биморфный асимметричный, *в* – триморфный планарный; *г* – триморфный симметричный компланарный, *д* – триморфный асимметричный компланарный; ПЭ – пьезоэлемент, Me – металлическая пластина

Триморфные элементы – это элементы, состоящие из двух пьезоэлементов и металлической пластины (рис.2.9, в-д). В зависимости от взаимного расположения ПЭ и Me различают планарные триморфные элементы (ПЭ в одной плоскости с одной стороны Me – рис.2.9, в) и компланарные (ПЭ располагаются в разных плоскостях с одной стороны Me – асимметричные компланарные триморфные элементы (рис.2.9, г) или с двух сторон от Me – симметричные компланарные триморфные элементы – рис.2.9, д).

Присоединение к асимметричному биморфному элементу еще одного ПЭ приводит к увеличению жесткости колебательной системы,



повышению ее резонансной частоты и снижению чувствительности. Таким образом, особого выигрыша в чувствительности здесь не происходит. С другой стороны, использования двух пьезоэлементов усложняем конструкцию и схему подключения ПЭ к электрической цепи.

Таким образом, анализируя все приведенные типы пьезопреобразователей, можно сделать вывод, что наиболее подходящим для использования в качестве датчика компьютерной системы определения эффекта Коанда является асимметричный биморфный пьезопреобразователь, который мы и будем в дальнейшем рассматривать.

#### **2.4. Выводы к главе 2**

1. Разработан метод определения точек наибольшего напряжения, что позволяет определить места установки датчиков для преобразования механических деформаций в электрический сигнал.

2. Исследования компьютерной модели АВРК в инструментальной среде SolidWorks Simulatuin показало, что деформации подвержены не только движущиеся детали, а именно, дейдвудный, упорный и опорные подшипники, но точки максимального напряжения приходятся на лонжероны АВРК и место крепления мотогондоллы к корпусу судна.

3. Проанализированы основные типы первичных преобразователей для регистрации механических напряжений в компьютерных системах определения эффекта Коанда: резистивные, тензометрические, оптические и пьезоэлектрические. В результате анализа определено, что наиболее перспективными для применения являются пьезокерамические преобразователи.

4. В результате анализа типов одно- и полиморфных пьезопреобразователей определено, что наиболее подходящим для использования в качестве датчика компьютерной системы определения эффекта Коанда является ассиметричный биморфный пьезопреобразователь.

## ГЛАВА 3

### ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДАТЧИКОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ

#### 3.1. Модель датчика с биморфом

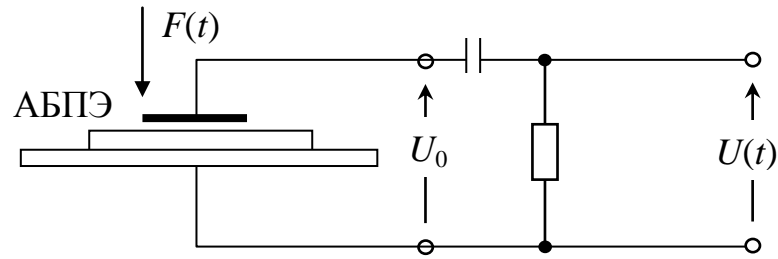
В подразделе 2.4.4 было определено, что наилучшими для использования в качестве датчиков компьютерных систем определения эффекта Коанда являются асимметричные биморфные пьезоэлементы (АБПЭ).

Существует шесть различных режимов работы ПЭ [47]:

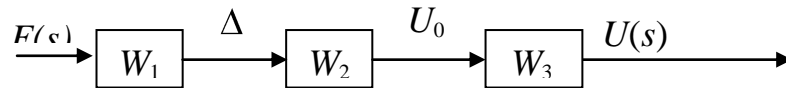
- прямого пьезоэффекта;
- обратного пьезоэффекта;
- пьезотрансформаторный по напряжению;
- пьезотрансформаторный по деформации;
- генераторный;
- силовой компенсации.

Принципиальная и структурная схемы режима прямого пьезоэффекта АБПЭ представлены на рис. 3.1.

На рисунке  $U_{op}$  – напряжение на зажимах ПЭ с последующим преобразованием в напряжение  $U(t)$ , которое выделяется на нагрузочное сопротивление  $R_n$ ,  $C$  – емкости ПЭ. Преобразователь представляется в виде трех последовательных звеньев. Звено  $W_o(p)$  вводится для выделения упругих и инерционных свойств ПЭ,  $W(p)$  – для связки механических и электрических параметров,  $W_m(p)$  образуется путем последовательного соединения электрической емкости ПЭ и сопротивления нагрузки, т.е. является связующим для входа и выхода дифференцирующей RC-цепочки.



а)



б)

Рис. 3.1. Работа АБПЭ в режиме прямого пьезоэффекта:

а) – принципиальная схема; б) – структурная схема

Передаточные функции первого преобразования:

$$W_1(s) = \frac{1}{\Psi_1(T^2 s^2 + 2\xi_1 T s + 1)}, \quad (3.1)$$

где  $\Psi_1 = \frac{E_\gamma l_2 l_3^3}{l^3}$  – коэффициент упругости системы ПЭ-пластина;

$\xi_1 = \frac{b}{2\sqrt{\Psi_1 m}}$  – коэффициент затухания колебаний АБПЭ;  $T_1 = \sqrt{\frac{m}{\Psi_1}}$  –

постоянная времени.

$$W_2(s) = \frac{U_0}{\Delta} = \Psi_2, \quad (3.2)$$

где  $\Psi_2 = 2,2 \cdot 10^{-12} \varepsilon^2 l_2 E_p$  – коэффициент, показывающий пьезоэлектрические явления.

$$W_3(s) = T_3 s + 1, \quad (3.3)$$

где  $T_3 = RC$  – постоянная времени дифференцирующей RC-цепочки.

Общая передаточная функция имеет вид:

$$W_{\Sigma}(s) = W_1(s)W_2(s)W_3(s). \quad (3.4)$$

Подставляя (3.1), (3.2) и (3.3) в (3.4), получим

$$W_{\Sigma}(s) = \frac{\Psi_2(T_3s + 1)}{\Psi_0(T_1^2s^2 + 2\xi_1T_1s + 1)}.$$

Выведем АЧХ и ФЧХ в режиме прямого пьезоэффекта, для этого заменим оператор Лапласа  $s$  на  $j\omega$ :

$$W_{\Sigma}(j\omega) = \frac{\Psi_2(T_3\omega + 1)}{\Psi_1(T_1^2\omega^2 + j2\xi_1T_1\omega + 1)} = \Psi_3 \left[ \frac{1 - T_1^2\omega^2 + 2T_3\xi_1\omega^2}{(1 - T_1^2\omega^2)^2 + 4\xi_1^2T_1^2\omega^2} + j \frac{T_3\omega + T_3T_1\omega^2 - 2\xi_1T_1\omega}{(1 - T_1^2\omega^2)^2 + 4\xi_1^2T_1^2\omega^2} \right],$$

где  $\Psi_3 = \frac{\Psi_2}{\Psi_1}$ .

В результате получаем:

$$L(\omega) = \frac{\Psi_{31} \sqrt{(1 - T_1^2\omega^2 + 2T_3\xi_1\omega^2)^2 + (T_3\omega + T_3T_1\omega^2 - 2\xi_1T_1\omega)^2}}{(1 - T_1^2\omega^2)^2 + 4\xi_1^2T_1^2\omega^2},$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \left( \frac{T_3\omega - T_3T_1^2\omega^2 - 2\xi_1T_1\omega}{2T_3\xi_1T_1\omega^2 + 1 - T_1^2\omega^2} \right).$$

Режим обратного пьезоэффекта (рис. 3.2) используется при преобразовании электрической величины (напряжения) в механическую – прогиб АБПЭ.

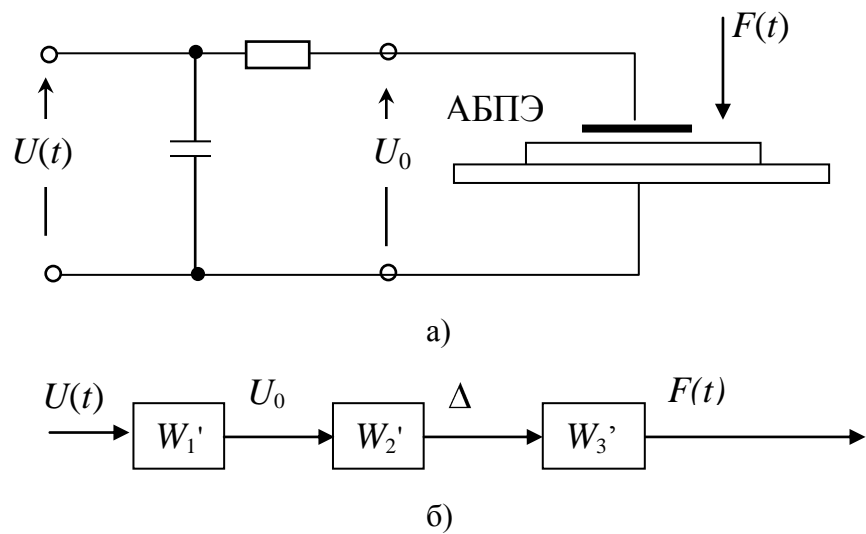


Рис. 3.2. Работа АБПЭ в режиме обратного пьезоэффекта:

а) – принципиальная схема; б) – структурная схема

Процесс такого преобразования (как и в случае режима прямого пьезоэффекта) также выполняется в три этапа. На первом этапе напряжение от источника  $U$  преобразуется из одного вида в другой –  $U_0$ . Такое динамическое преобразование осуществляется с помощью последовательно соединенных сопротивления источника  $R_u$  и емкости АБПЭ  $C$ , которые в данном случае образуют интегрирующую RC-цепочку. На втором этапе напряжение  $U_0$  в результате обратного пьезоэффекта преобразуется в электрическую силу  $F$ . Далее эта сила, приложенная к упругой системе АБПЭ, вызывает в ней деформацию  $\Delta$ .

Для аналитического описания режима сделаем те же операции, что и в предыдущем случае:

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1 s + 1},$$

где  $T_1 = R C$  – постоянная времени интегрирующей RC-цепочки.

$$W_2(s) = \frac{\Psi_2}{\Psi_1},$$

где  $\Psi_2 = \frac{3 \cdot 10^{11} l_3^2 E_y}{\varepsilon^2 E_p l_1^2}$ , так как  $W_{\Sigma 2}(p) = W_1(s)W_2(s)W_3(s)$ ,

то после подстановки получим:

$$W_{\Sigma 2}(s) = \frac{\Psi_3}{(T_1^2 s^2 + 2\xi_0 T_1 s + 1)(T_2 s + 1)},$$

где  $\Psi_3 = \Psi_2 / \Psi_1$ .

$$\begin{aligned} W_2(j\omega) &= \frac{\Psi_3}{(1 - T_1^2 \omega^2 + j2\xi_0 T_1 \omega + 1)} = \\ &= \Psi_3 \frac{1 - T_1^2 \omega^2 - 2\xi_0 T_1 T_2 \omega^2}{(1 - T_1^2 \omega^2 + 2\xi_0 T_1 T_2 \omega^2)^2 + (T_2 \omega + 2\xi_0 T_2 \omega - T_1^2 T_2 \omega^3)^2} - \\ &- j\Psi_3 \frac{T_2 \omega^2 - 2\xi_0 T_2 \omega - T_1^2 T_2 \omega^3}{(1 - T_1^2 \omega^2 + 2\xi_0 T_1 T_2 \omega^2)^2 + (T_2 \omega + 2\xi_0 T_1 \omega - T_1^2 T_2 \omega^3)^2}. \end{aligned}$$

Отсюда:

$$\begin{aligned} L(\omega) &= \frac{\Psi_3 \sqrt{(1 - T_1^2 \omega^2 - 2\xi_0 T_1 T_2 \omega^2)^2 + (T_2 \omega + 2\xi_0 T_1 \omega - T_1^2 T_2 \omega^3)^2}}{(1 - T_1^2 \omega^2 + 2\xi_0 T_1 T_2 \omega^2)^2 + (T_2 \omega + 2\xi_0 T_1 \omega - T_1^2 T_2 \omega^3)^2}. \\ \varphi(\omega) &= \arctg \left( \frac{T_2 \omega^2 + 2\xi_0 T_1 \omega - T_1^2 T_2 \omega^3}{1 - T_1^2 \omega^2 - 2\xi_0 T_1 T_2 \omega^2} \right). \end{aligned}$$

Последовательно применим принципы обратного и прямого пьезоэффекта (рис. 3.3).

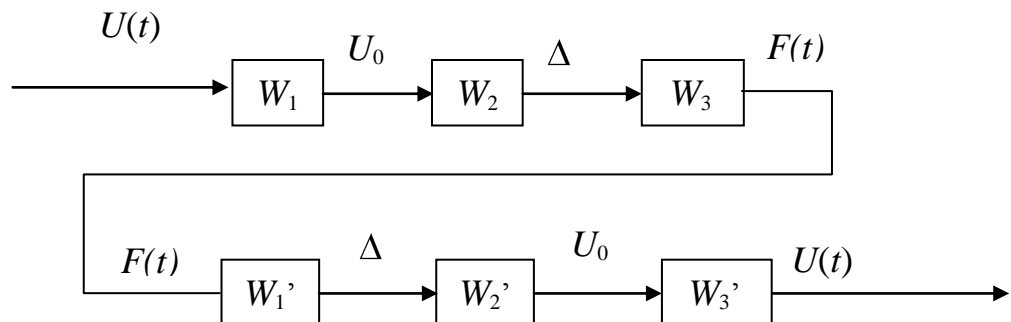


Рис. 3.3. Последовательное применение режимов работы АБПЭ

В полученной структурной схеме подаваемое напряжение  $U(t)$  преобразовывается в напряжение на контактах АБПЭ, деформируется  $\Delta$ , вырабатывая силу  $F(t)$ , которая в свою очередь приводит к деформации  $\Delta$  АБПЭ и появлению напряжения  $U_0(t)$  на контактах. На рис. 3.4, а, б представлены схемы включения синхронных БПЭ. Как видно из структурной схемы, один из блоков повторяется два раза и может быть сокращен в случае подключения БПЭ по схеме рис. 3.4, в.

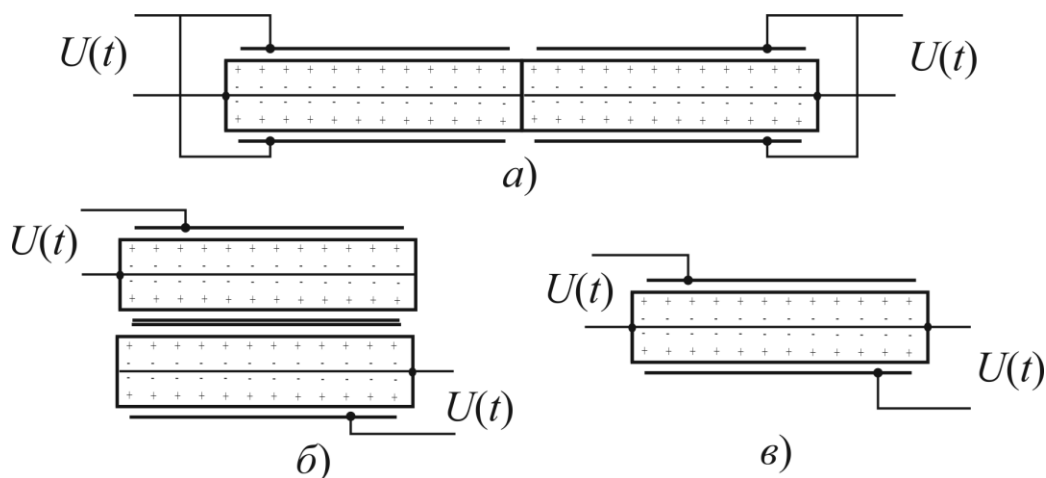


Рис. 3.4. Варианты включения ПЭ: а) – последовательно; б) – параллельно; в) – используя один элемент

### 3.2 Модель датчика пьезотрансформатор по напряжению

Режим пьезоэлектрического трансформатора (по напряжению). Структурная и принципиальная схемы такого преобразователя представлены на рис. 3.5.

Процесс преобразования может быть осуществлен с помощью интегрирующей RC-цепочки, упругой системы АБПЭ и дифференцирующей RC-цепочки (рис. 3.3) при одновременном использовании прямого и обратного пьезоэффектов



$$W_{\Sigma 3}(s) = \frac{\Psi_4(T_4s + 1)}{(T_1^2s^2 + 2\xi_0T_1s + 1)(T_2s + 1)},$$

где  $\Psi_4 = \frac{\Psi_2\Psi_3}{\Psi_1}$ .

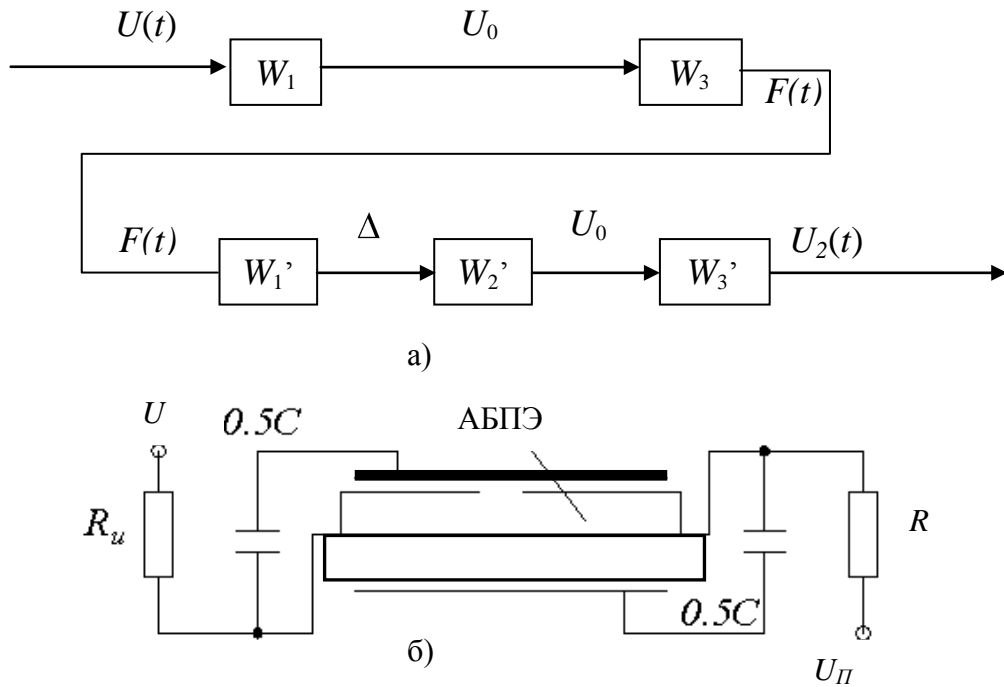


Рис. 3.5. Режим пьезоэлектрического трансформатора по напряжению:

а) – структурная схема; б) – принципиальная схема

Отсюда

$$L(\omega) = \frac{\Psi_4}{k_2 + l_2} \sqrt{(kT_4\omega - l)^2 + (lT_4\omega - k)^2},$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{T_4\omega k - l}{k + T_4\omega l}\right),$$

где  $k = 1 - T_1^2\omega^2 - 2\xi_0T_1T_2\omega^2$ ;  $l = T_2\omega + 2\xi_0T_1\omega - T_1^2T_2\omega^3$ .

### 3.3 Модель датчика с использованием генераторного режима

Режим с функционально разделенными пьезоэлементами (генератор) (рис. 3.6) является наиболее распространенным. Здесь используется пьезоэлектрический трансформатор, который включен в обратную связь усилителя. Такая схема, если ее рассматривать как преобразователь, способна осуществлять преобразование механической величины в частоту, т.е. представляет собой частотный ИП.

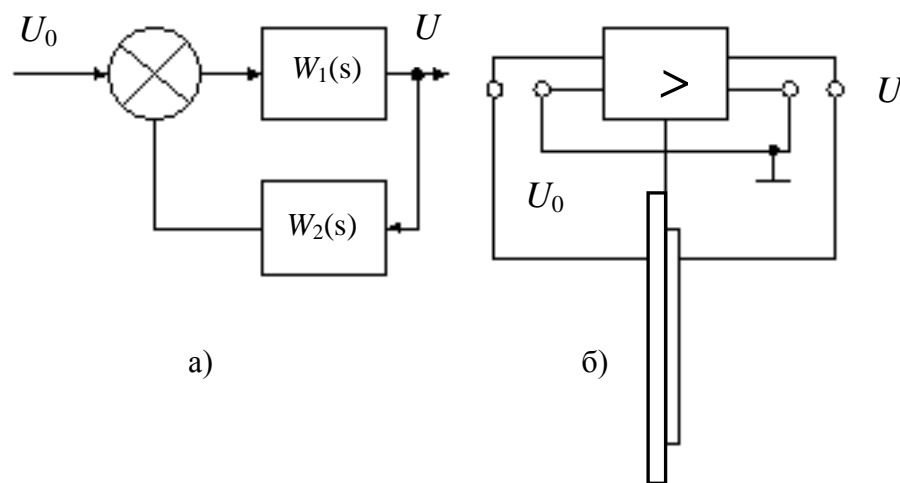


Рис. 3.6. Режим с функционально разделенными пьезоэлементами

Так как быстродействие усилителя, как правило, на несколько порядков выше быстродействия пьезоэлектрического трансформатора, то для практических целей можно считать усилитель безинерционным и в структурной схеме характеризовать его коэффициентом усиления  $A$ . В этом случае передаточная функция генератора:

$$W_{\Sigma 5}(s) = \frac{A_y}{1 + A_y W_{\Sigma 3}(s)}. \quad (3.5)$$

Если в (3.5) подставить значение передаточной функции  $W_{\Sigma 3}(s)$ , то:

$$\frac{A (l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s + 1)}{k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + 1} = \frac{U}{U_0},$$

$$\text{где } k_3 = \frac{T_1^2 - T_2}{1 + A \Psi_4}; \quad k_2 = \frac{T_1^2 + 2\xi_0 T_1 T_2}{1 + A \Psi_4}; \quad k_1 = \frac{2\xi_0 T_1 + A \Psi_4 T_2 + T_2}{1 + A \Psi_4}; \quad l_3 = T_1^2 T_2;$$

$$l_2 = T_1^2 + 2\xi_0 T_1 T_2; \quad l_1 = T_1 + 2\xi_0 T_1.$$

Отсюда АЧХ и ФЧХ будут описываться следующим образом:

$$L(\omega) \approx \frac{A}{x} \sqrt{y^2 + z^2};$$

$$\varphi(\omega) \approx \arctg \frac{z}{y},$$

$$\text{где } z = (1 - y_2 \omega^2) (x_3 \omega^3 - x_1 \omega) + (y_1 \omega - y_3 \omega^3) (1 - x_2 \omega^2);$$

$$y = (y_1 \omega - y_3 \omega^3) (x_1 \omega - x_3 \omega^3) + (1 - y_2 \omega^2) (1 - x_2 \omega^2);$$

$x = (1 - x_2 \omega^2) + (x_1 \omega - x_3 \omega^3)^2$  – может быть найден, как знаменатель в выражении АЧХ из режима 3.

### 3.4 Моделирование биморфного пьезопреобразователя

В качестве опытного образца были взяты пьезоэлементы фирмы Керо Electronics типа MFT (рис. 3.7) на основе керамики  $\text{TiBaO}_3$  со следующими характеристиками:

- рабочий диапазон температур – 20 ... + 50 °С;
- резонансная частота  $4,0 \pm 0,5$  kHz;
- резонансное сопротивление 500  $\Omega$ ;
- эл. емкость 34 nF  $\pm 30$  %;
- диаметр латунной подложки 15 мм;
- диаметр пьезоэлемента 12 мм;
- толщина пьезоэлемента 0,21 мм;
- удельный вес  $7 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup>;
- коэффициент внутреннего трения 0,07 Н·с/м;
- модуль Юнга  $4 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>;

- напряженность электрического поля  $2 \cdot 10^6$  В/м.

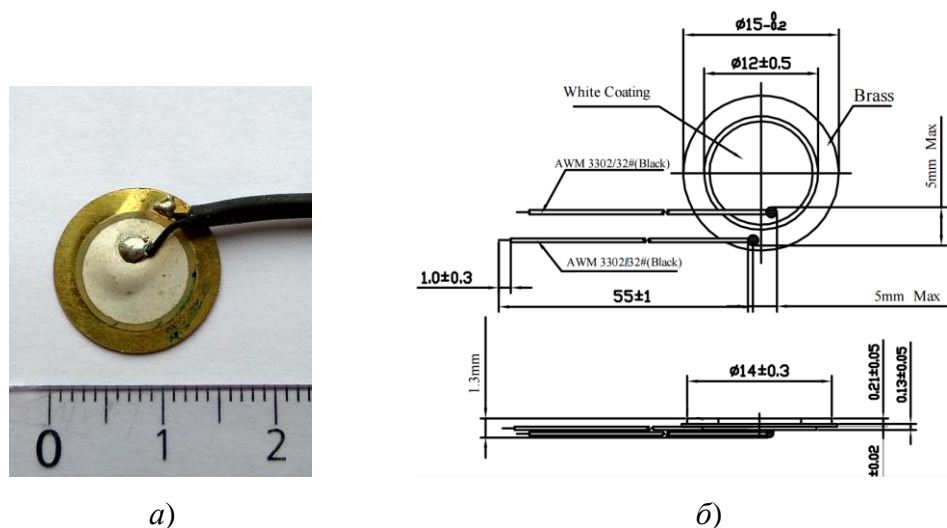
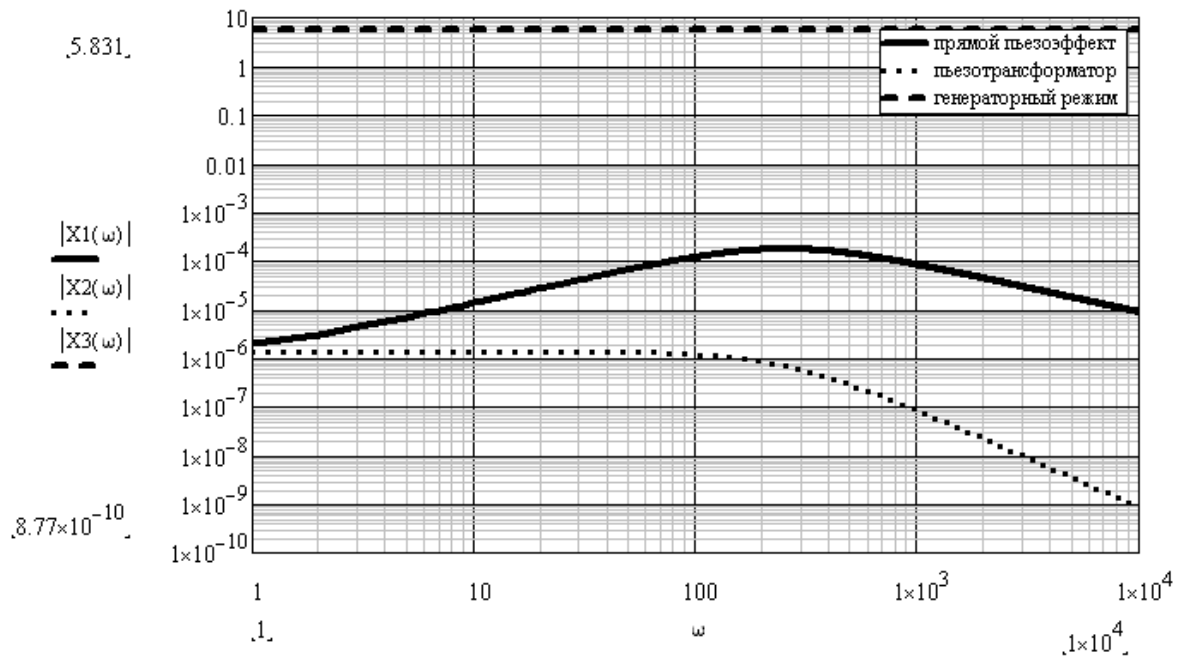


Рис. 3.10. Пьезоэлемент фирмы Керо Electronics типа MFT: *а)* – внешний вид; *б)* – физические размеры

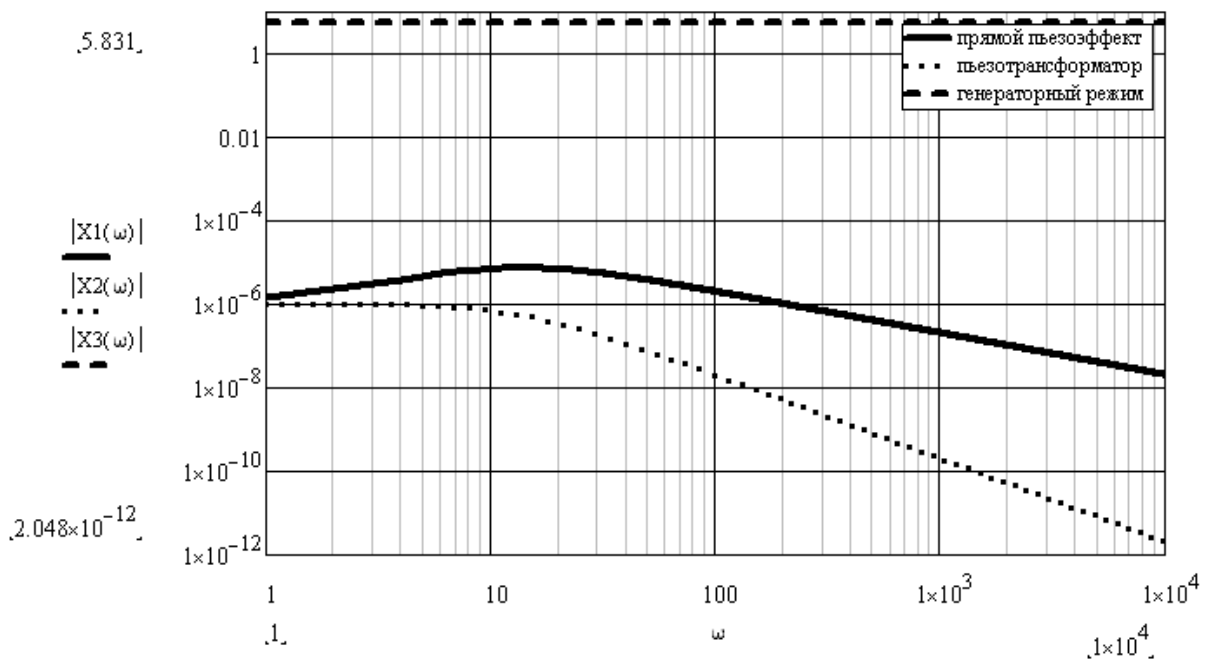
На рис. 3.8 показаны полученные графики АЧХ для пьезоэлементов различных геометрических размеров. На графике рис. 3.8, *а* взят ПЭ, интегрированный нами в многофункциональную платформу. На графике рис. 3.8, *б* приведен ПЭ с такими размерами, которые предполагается использовать на натурной АВРК. Представлены три режима:  $X1(\omega)$  – режим прямого пьезоэффекта;  $X2(\omega)$  – трансформаторный режим по напряжению;  $X3(\omega)$  – генераторный режим.

На рис. 3.9 представлен график АЧХ без использования логарифмической шкалы.

Анализируя полученные на рис.3.8 и 3.9 графики можно заметить, что при использовании прямого пьезоэффекта максимальный КПД системы приходится на пик характеристики соответствующий частоте резонанса. Если эта частота лежит в диапазоне звуковых частот (20 Гц ... 20 кГц) то использование установки в зоне обитания человека затруднительно. Так же, при использовании ПЭ в следящем режиме при времени переходного процесса более 2 с полезный сигнал может быть отсеян системой.



а)



б)

Рис. 3.8. Полученные АЧХ для различных геометрических размеров ПЭ  $\text{TiBaO}_3$ : а) – диаметр 1,5 см, толщина 0,21 мм; б) – диаметр 7,3 сантиметра, толщина 3,7 мм

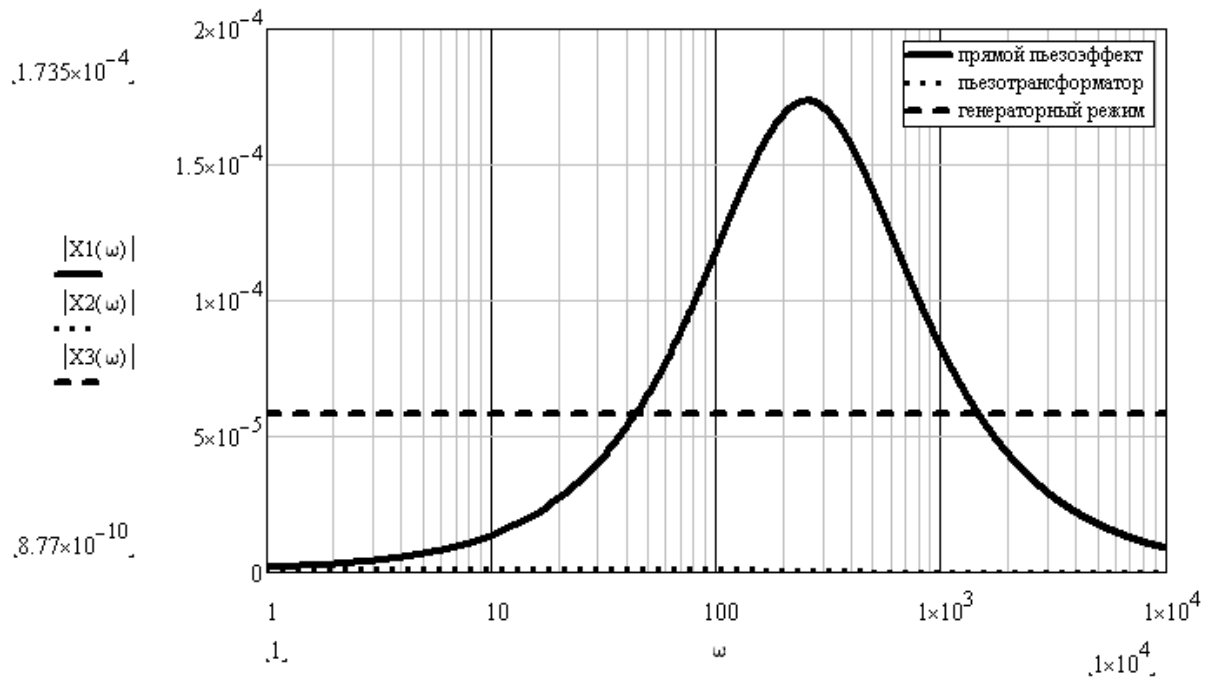
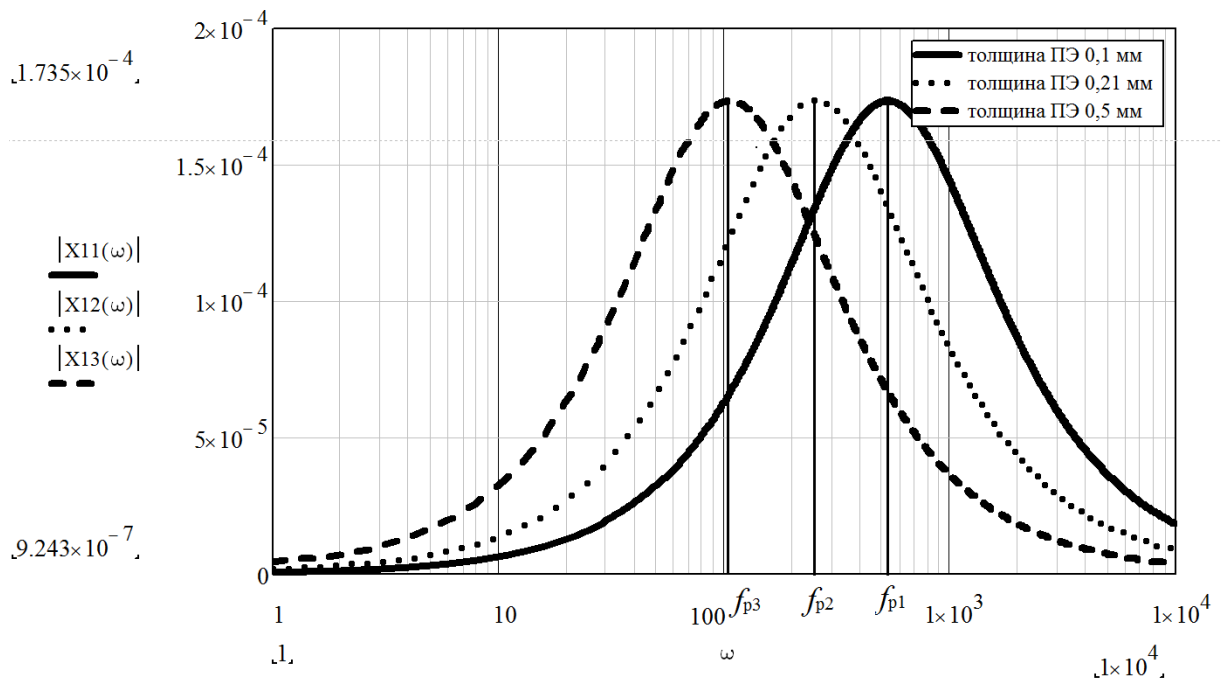


Рис. 3.9. Построение графика без использования логарифмической шкалы

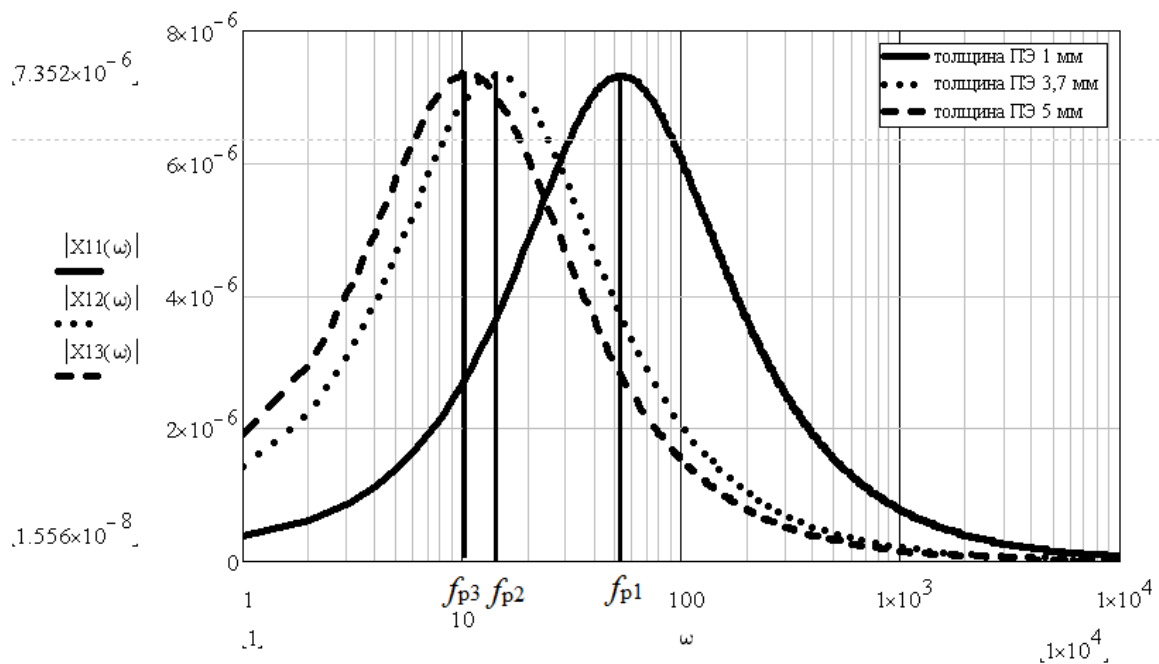
Проанализируем, как влияют физические размеры ПЭ на его работу в различных режимах. На рис. 3.10 представлены АЧХ для ПЭ включенного в режиме прямого пьезоэффекта.

Данные графики подтверждают, что изменение толщины ПЭ приводит к смещению частоты резонанса, а диаметр влияет на чувствительность.

На рис. 3.11 представлен ПЭ работающий в трансформаторном режиме.



а)

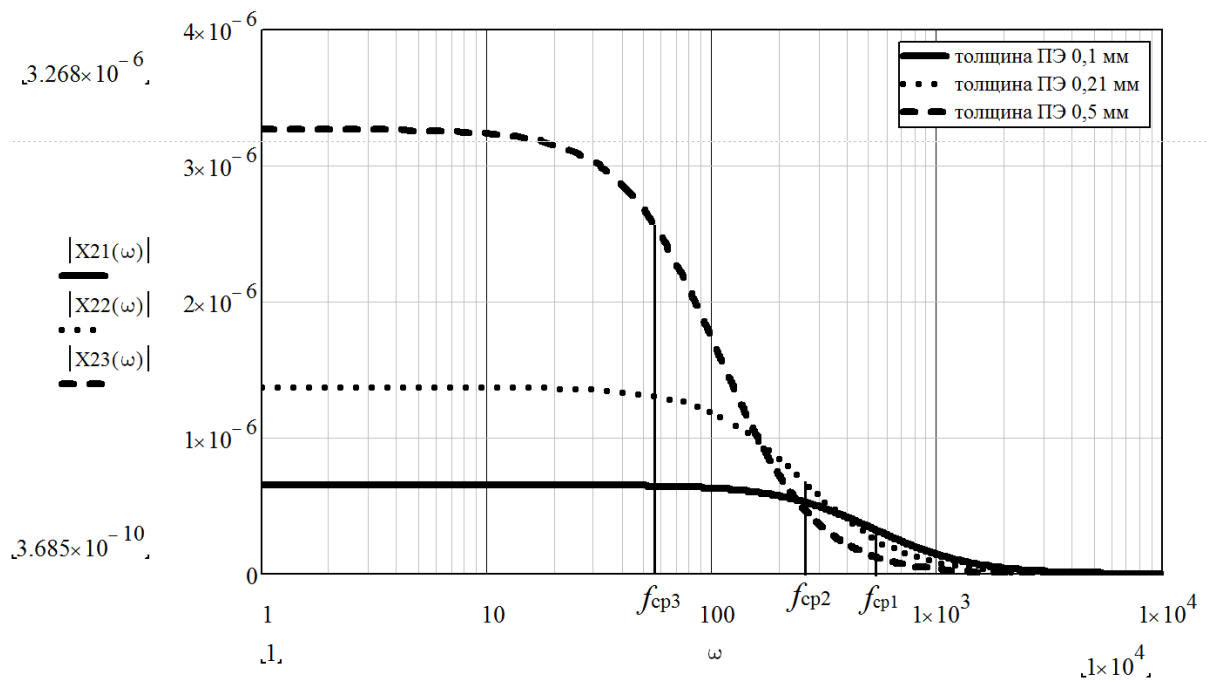


б)

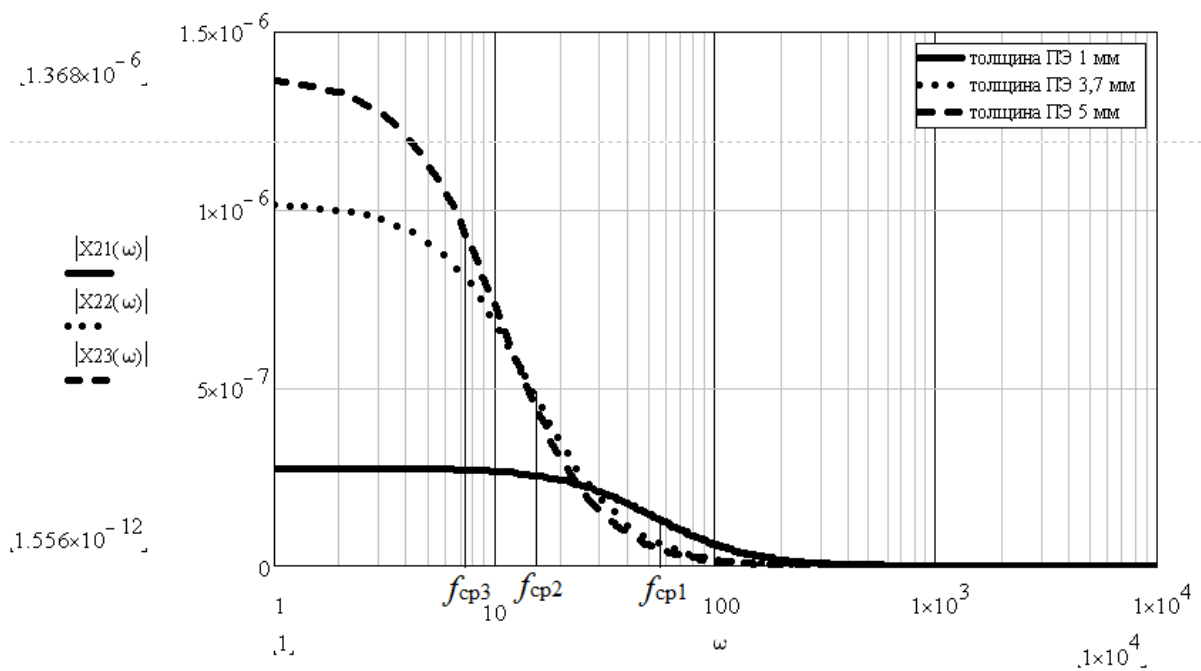
Рис. 3.10. Включение ПЭ в режиме прямого пьезоэффекта:

а) – диаметр 1,5 см;

б) – диаметр 7,3 см



a)



б)

Рис. 3.11. Работа ПЭ в трансформаторном режиме: а) – диаметр 1,5 см;

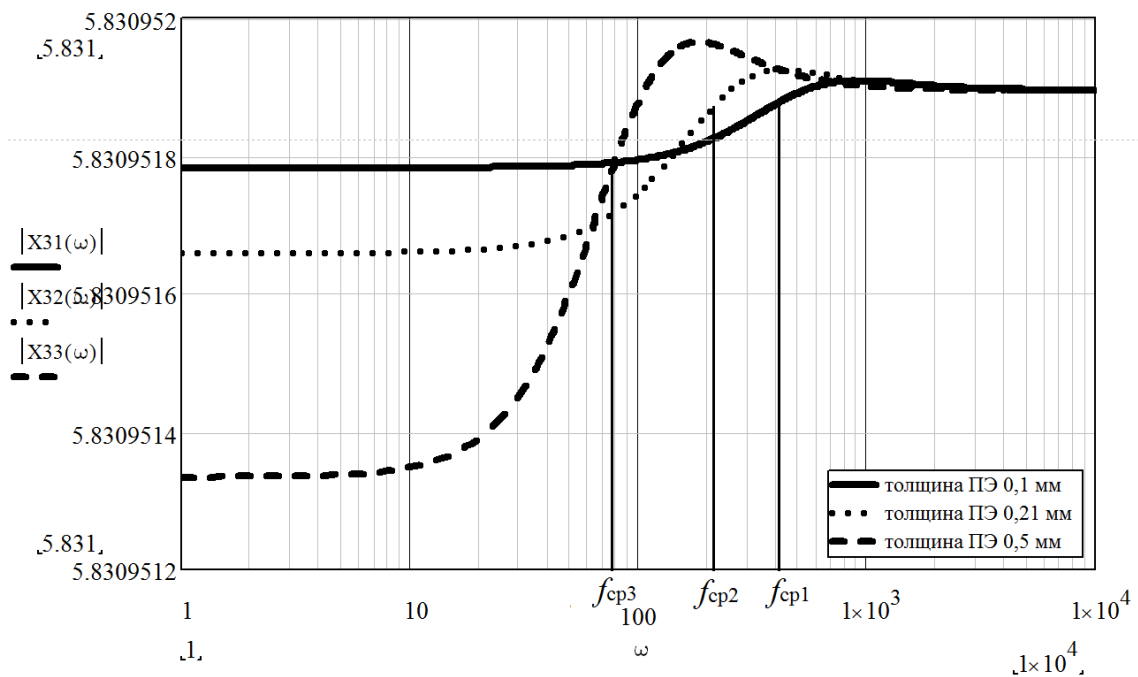
б) – диаметр 7,3 см

Из графиков видно, что толщина ПЭ влияет на частоту среза. Чем больше толщина, тем уже диапазон линейной характеристики (рабочий диапазон), но и больше коэффициент усиления. Применение этого режима

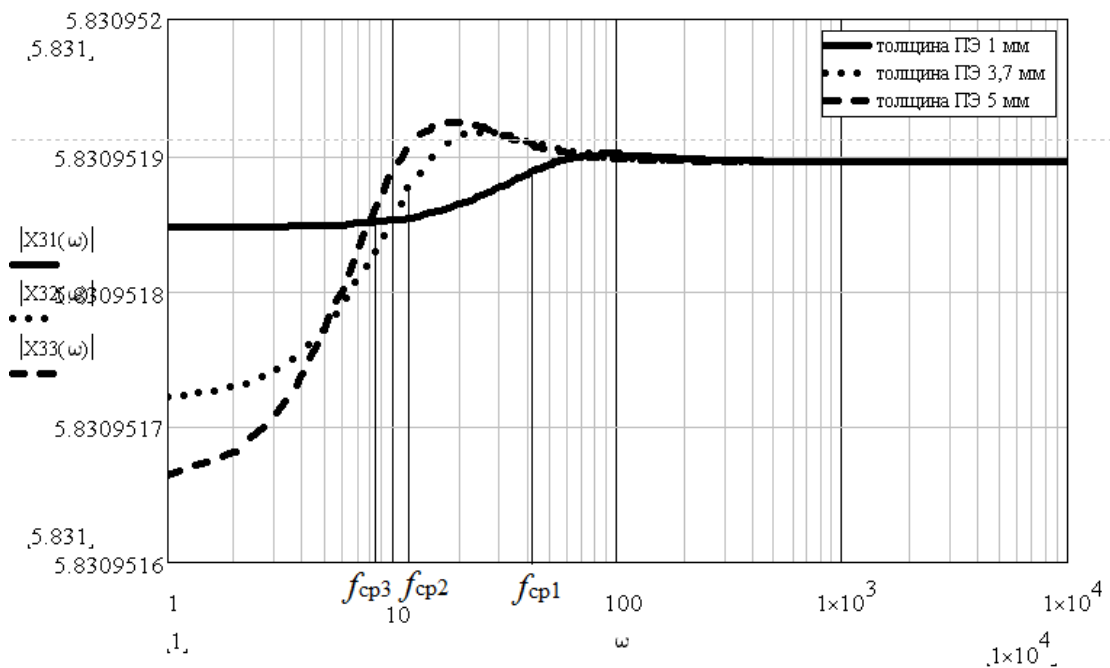


лежит в частотах ниже паспортной частоты резонанса.

На рис. 3.12 представлен ПЭ подключенный в генераторном режиме.



a)



b)

Рис. 3.12. Работа ПЭ в генераторном режиме: а) – диаметр 1,5 см;

б) – диаметр 7,3 см

Генераторный режим показывает наилучший коэффициент усиления. Толщина ПЭ влияет на изменение амплитуды характеристики. При наименьшей толщине ПЭ характеристика имеет наиболее горизонтальную характеристику с небольшим ступенчатым изменением на частоте резонанса ПЭ.

Проанализированы шесть известных режимов работы пьезокерамики. В результате проведенных исследований установлено, что в предложенной системе возможно использование трех режимов и получено следующее:

- режим пьезотрансформатора представляется как фильтр низких частот;
- режим прямого пьезоэффекта представляется как селективный фильтр;
- генераторный режим представляется как фильтр высоких частот.

Построены передаточные функции, схемы замещения и АЧХ.

Режим прямого пьезоэффекта отличается простотой конструкции, максимальный эффект, которого достигается работой на заданной паспортной частоте. Однако, под воздействием изменяющихся параметров окружающей среды могут изменяться параметры самого ПЭ и вследствие изменения резонансной частоты коэффициент усиления всей схемы может понизиться до такого порога, после которого полезный сигнал перестанет распознаваться системой.

Работа пьезотрансформаторного режима лежит в области низких частот и в области инфразвука. На частоте выше паспортной частоты резонанса ПЭ коэффициент усиления уменьшается до нуля. Установлено, что использование в режиме пьезотрансформатора ПЭ с минимальной толщиной имеет преимущество в большем диапазоне рабочей частоты и незначительном уменьшении коэффициента усиления.

Работа схемы построенной по генераторной схеме имеет линейный участок, начиная с паспортной частоты резонанса ПЭ – в области высоких частот и ультразвука. До этого участка характеристика зависит от

добротности. Если использовать максимально-возможно тонкие конструкции ПЭ, то можно перейти в области, ниже частоты резонанса, где характеристика также имеет горизонтальный вид. С точки зрения усиления сигнала генераторный режим лучше трансформаторного и прямого пьезоэффекта, однако, и сложнее в схемотехническом выполнении.

Перед выбором того или иного режима работы для интеграции разработанной компьютерной системы в натуральный объект дополнительно необходимо выполнение целого цикла исследований. Это связано с тем, что интеграция системы происходит в азимутальную винторулевою колонку, которая расположена в воде и испытывает влияние колебаний приходящих не только с установленного на судне оборудования, но и из водной среды. А в случае полупогружных плавучих буровых платформ, судов-кабелеукладчиков и трубоукладчиков суда испытывают дополнительные влияния на корпус и соответственно на АВРК. После исследования, какая область частот – инфразвук, ультразвук или звуковой диапазон, наиболее помехозащищена можно будет сделать рекомендации по выбору физических параметров ПЭ и по оптимальному режиму работы всей компьютерной системы на натурном объекте.

### **3.5 Анализ функциональных свойств пьезопреобразователей**

Для исследования моделей преобразователей необходимо учитывать реальные воздействия на чувствительные элементы. Наиболее типичные воздействия, которые встречаются на практике при измерении давления на пьезоэлемент – гармонические и ударные воздействия, а также импульсы с крутым передним и затухающим по экспоненте задним фронтом. Следует отметить, что большинство природных сигналов можно промоделировать с помощью указанных выше сигналов.

Гармонический сигнал может быть промоделирован с помощью источника синусоидального напряжения (Sine source) (рис. 3.13, а), импульсный – с помощью независимого источника напряжения сложной формы формата SPICE с сигналом экспоненциальной формы (EXP) (рис. 3.13, б).

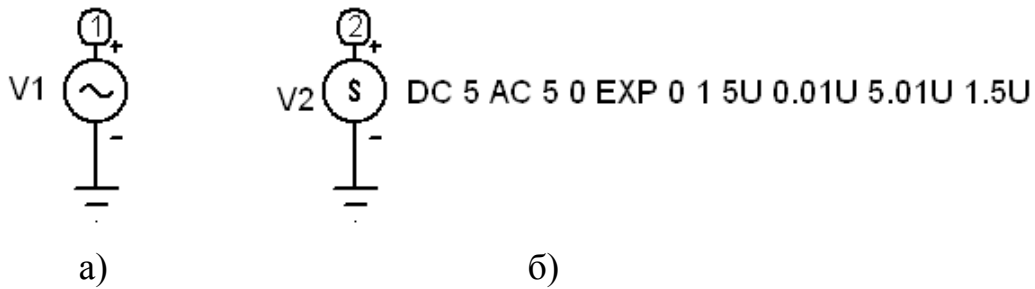


Рис. 3.13. Генераторы сигналов: а – гармонического, б – импульсного

Некоторые формы сигналов, образующихся при генерации с помощью генераторов сигналов по рис. 3.13, показаны на рис. 3.14.

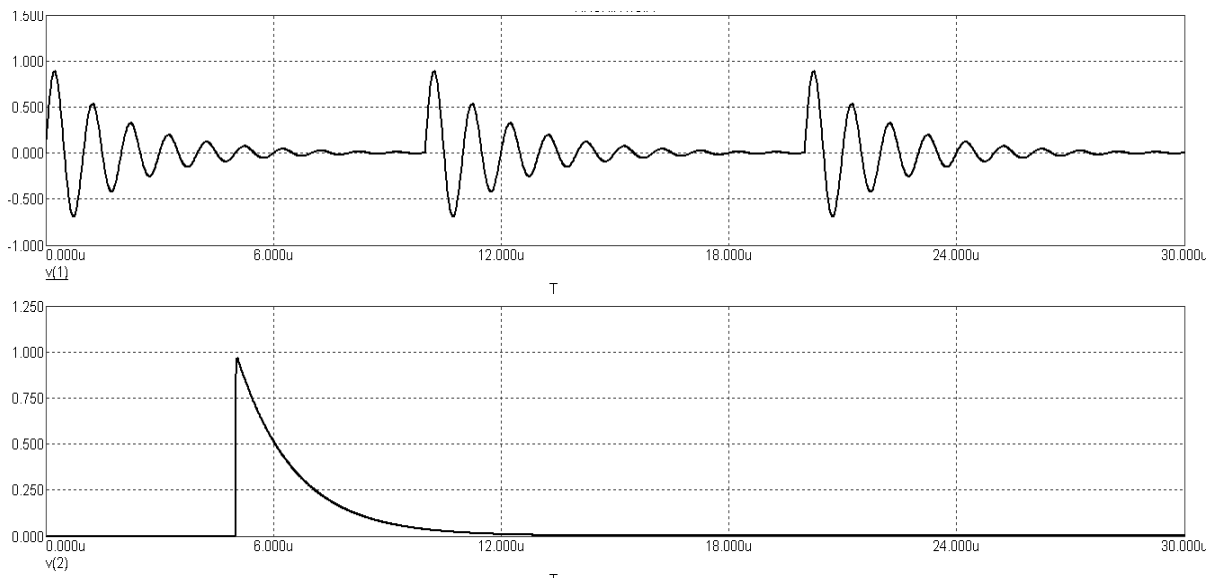


Рис. 3.14. Формы сигналов, образующихся при генерации с помощью генераторов сигналов по рис. 3.13

Для проведения моделирования необходимо учесть эквивалентную электрическую схему биморфного пьезоэлемента [52], которая показана на рис. 3.15.

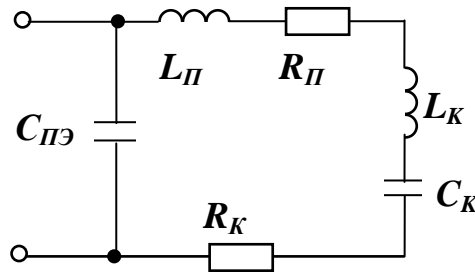


Рис. 3.15. Эквивалентная схема биморфного пьезоэлемента

На рис. 3.15  $C_{ПЭ}$  – межэлектродная емкость;  $C_{К}$ ,  $L_{К}$ ,  $R_{К}$  – динамическая емкость, индуктивность и сопротивление;  $L_{П}$ ,  $R_{П}$  – параметры, описывающие свойства пластины.

Для получения функциональной модели рассмотрим процессы, которые происходят в пьезоэлементе под влиянием давления, то есть превращение силы, действующей на пьезоэлемент, в электрическое напряжение на электродах пьезоэлемента. Для этого воспользуемся методом электромеханических аналогий, при котором эквивалентом силы является электрическое напряжение  $U_{ЭКВ}$ , а эквивалентом механической деформации – электрический заряд. Тогда процесс преобразования силы напряжение будет иметь вид, показанный на рис. 3.16.

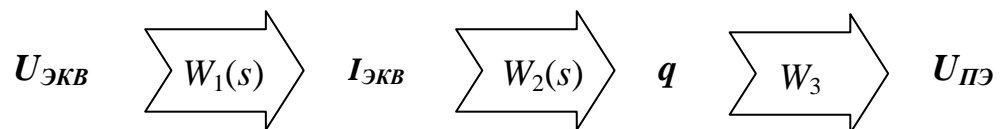


Рис. 3.16. Схема преобразований при прямом пьезоэффекте

Первое преобразование описывается выражением, соответствует проводимости элемента [52, 96]:

$$Y = j\omega C_{ПЭ} + \frac{\omega^2 C_K^2 R_K + j(-\omega^2 C_K L_K) \omega C_K}{(-\omega^2 C_K L_K) + \omega^2 C_K^2 R_K^2}$$

Для получения передаточной функции второго преобразования необходимо учесть модуль Юнга (E) и оператор дифференцирования s, поскольку значение тока получается дифференцированием значение заряда. получаем:

$$W_2(s) = \frac{q}{I_{EKB}} E = \frac{E}{s},$$

где s – оператор Лапласа.

Преобразование заряда q в напряжение на электродах пьезоэлемента  $U_{ПЭ}$  описывается выражением:

$$W_3 = \frac{U_{ПЭ}}{q} = \frac{1}{C_{ПЭ}}.$$

Общая передаточная функция имеет вид:

$$W(s) = W_1 W_2(s) W_3.$$

Для расчетов учтем электрические параметры пьезоэлемента фирмы Керо Electronics типа MFT (рис. 3.10, а).

Функциональная модель пьезоэлемента, полученной с использованием среды пакета СхСАПР, изображена на рис. 3.17.

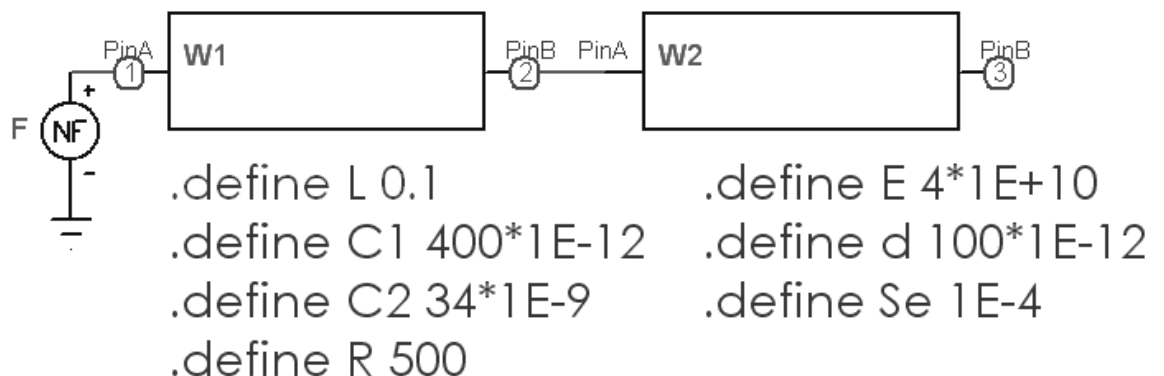


Рис. 3.17. Функциональная модель пьезоэлемента

Функциональный генератор  $F$  имитирует механическое воздействие. Амплитудночастотна и фазочастотных характеристики функциональной модели показаны на рис. 3.18.

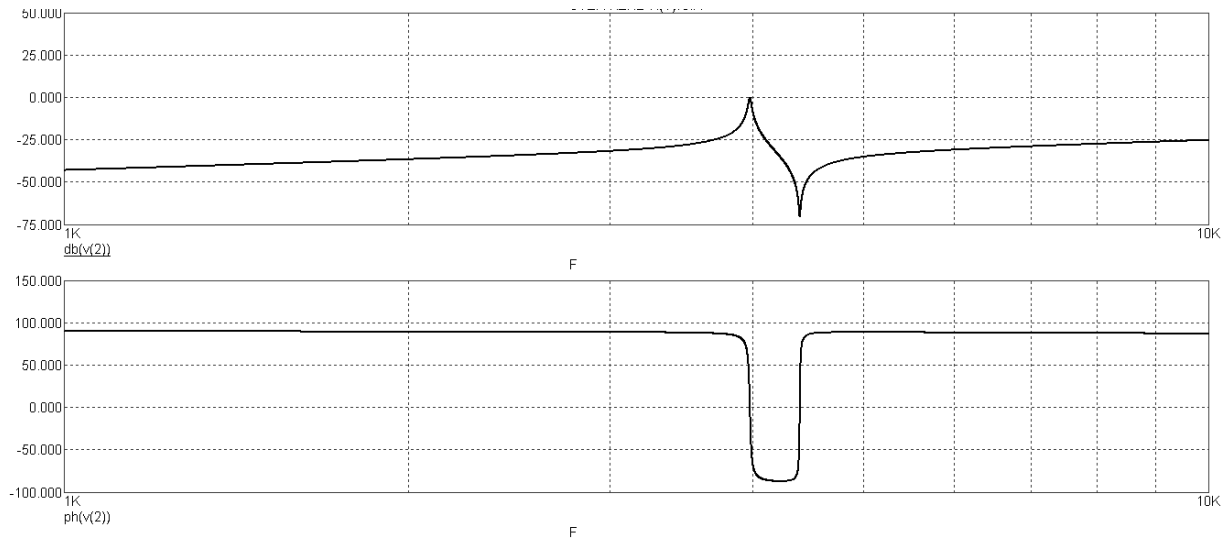


Рис. 3.18. Амплитудно (а) и фазочастотные (б) характеристики функциональной модели биморфного пьезоэлемента

Более сложная функциональная модель биморфного пьезоэлемента с усилителем заряда, полученная с использованием среды СхСАПР, изображена на рис. 3.19.

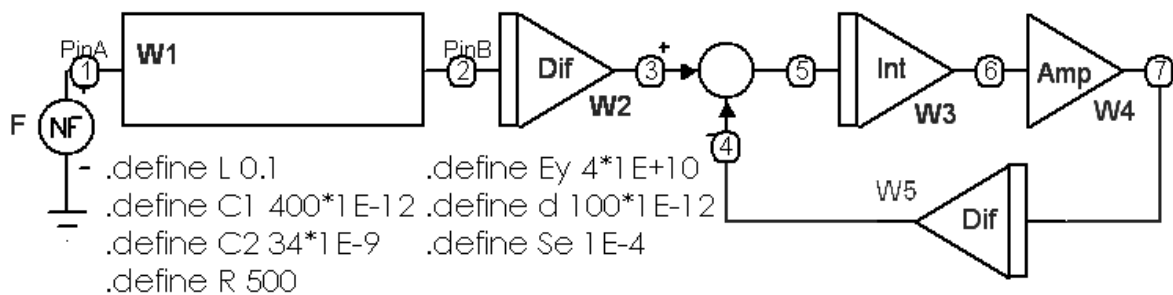


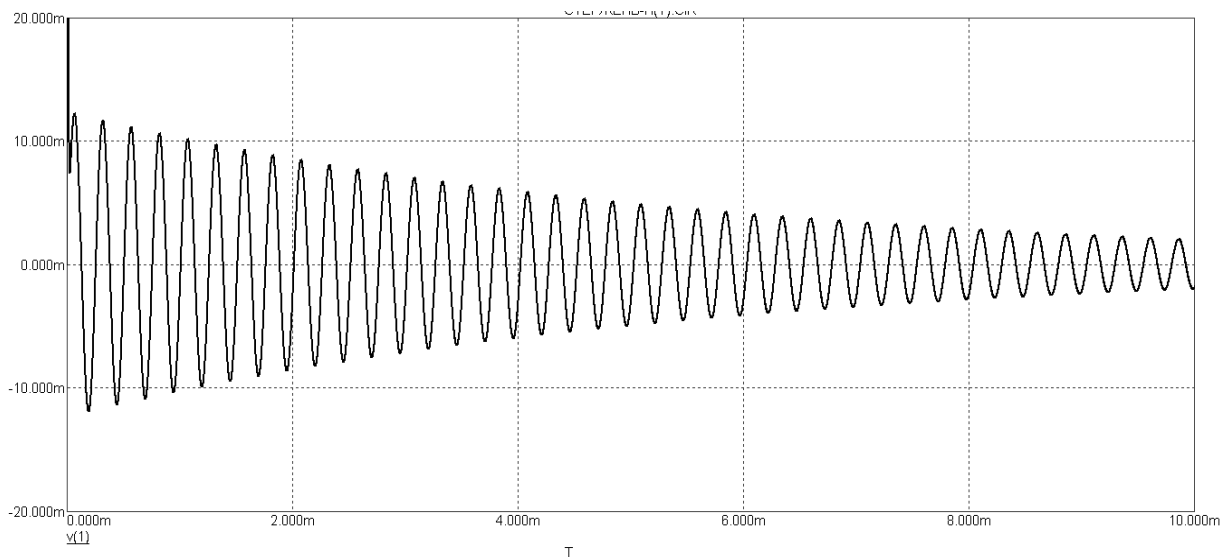
Рис. 3.19. Функциональная модель биморфного пьезоэлемента с усилителем заряда

Для упрощения модели звено  $W1$  соответствует общей передаточной функции двух звеньев по рис. 3.17 –  $W1$  и  $W2$ .

Передаточная функция всей системы примет вид:

$$W_{\Sigma}(s) = \frac{W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_4}{1 + W_3(s)W_4W_5(s)}.$$

Амплитудно и фазочастотных характеристики соответствующей модели существенно приближены к значениям, показанным на рис. 3.18. Переходная характеристика функциональной модели показана на рис. 3.20.



Рассмотрим схмотехническую модель исследуемого преобразователя с использованием среды СхСАПР. Для этого в модель, изображенную на рис. 3.17, необходимо добавить RLC элементы, которые показаны на рис.3.15. Схмотехническая модель полученного биморфного пьезоэлемента показана на рис. 3.21.

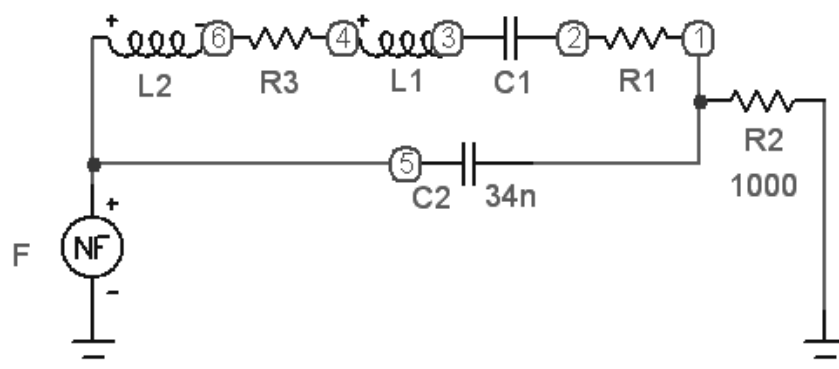


Рис. 3.21. Схмотехническая модель биморфного пьезоэлемента



Частотные характеристики схемотехнической модели такого преобразователя приведены на рис. 3.22.

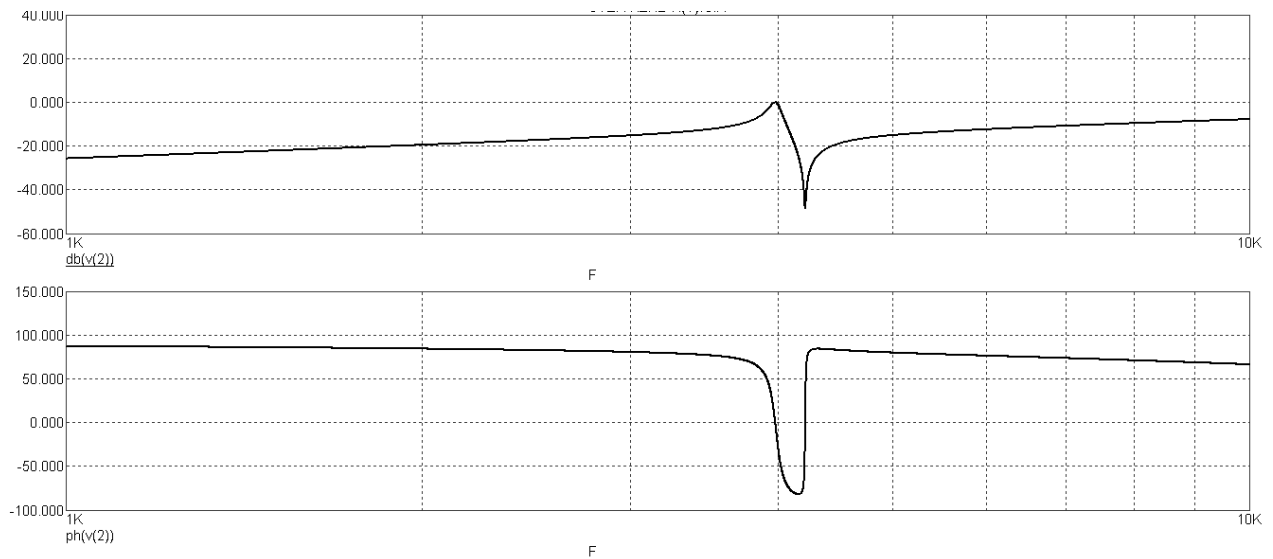


Рис. 3.22. Амплитудно (а) и фазочастотных (б) характеристики схемотехнической модели биморфного пьезоэлемента

Как видно из рис. 3.18 и рис.3.22, характеристики обеих моделей достаточно похожи, что подтверждает адекватность полученных функциональных и схемотехнических моделей.

Далее необходимо рассмотреть устойчивость системы. Для этого наиболее удобно использовать критерий Найквиста. При этом необходимо и достаточно, чтобы годограф при изменении частоты от 0 до  $\infty$ , не охватывал точку с координатами  $[-1, j0]$ .

Годограф Найквиста исследуемой модели изображен на рис. 3.26.

Как видно из рис. 3.23, годограф Найквиста не пересекает ось  $Re$  в ее отрицательной части и находится в квадрантах III и IV. Значит, пьезодатчики в данном случае являются устойчивыми системами.

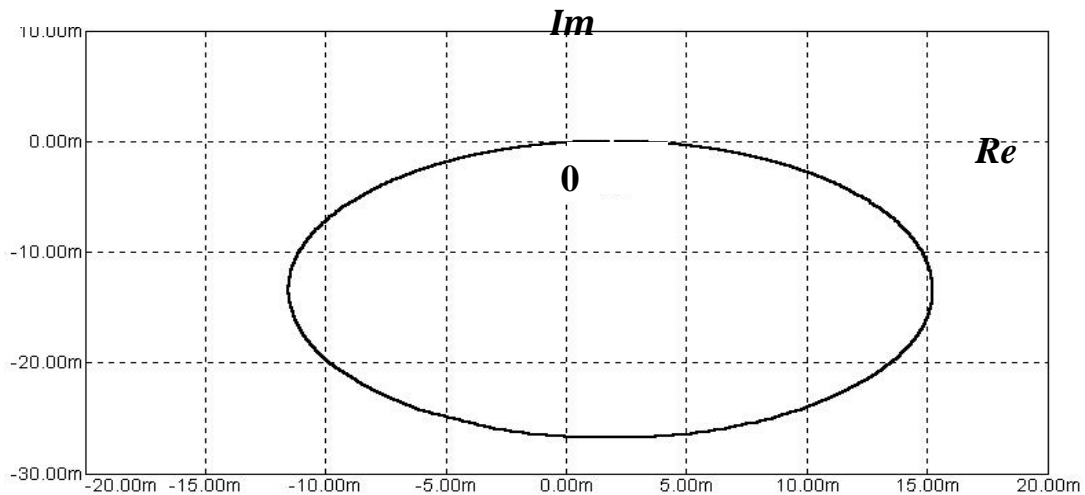


Рис. 3.23. Годограф Найквиста

Реакция биморфного пьезоэлемента на сигналы специальной формы показаны на рис. 3.24.

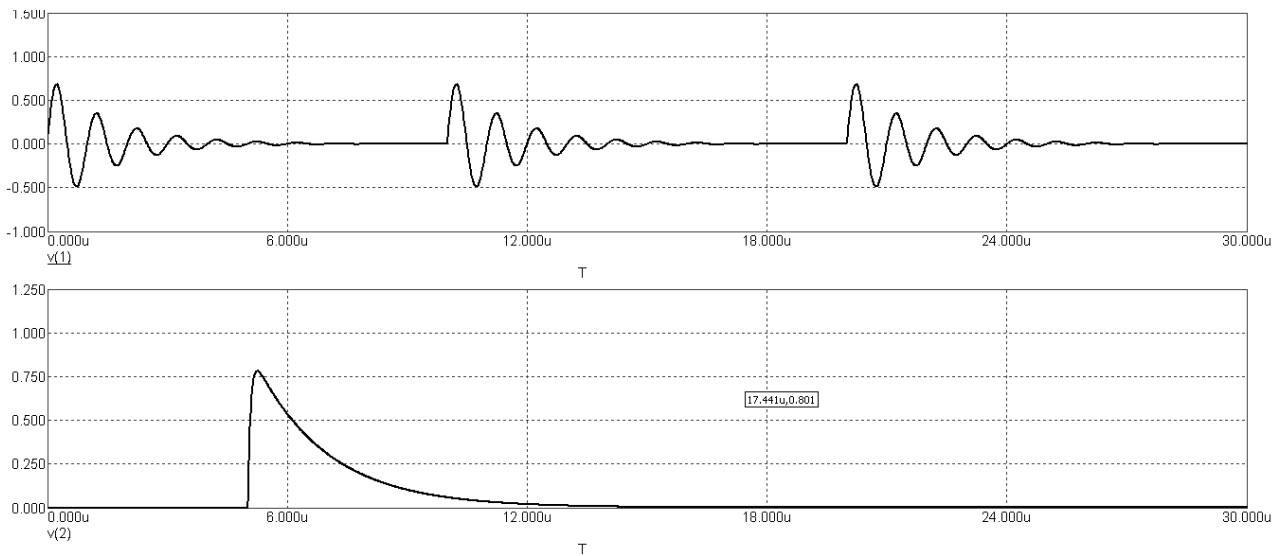


Рис. 3.24. Реакция биморфного пьезоэлемента на сигналы специальной формы

Как видно из рис. 3.24, реакция на гармонический сигнал с затуханием не имеет изменений. Импульсный сигнал передан с некоторым искажением.

### 3.6 Выводы к главе 3

Проанализированы шесть известных режимов работы пьезокерамики. В результате проведенных исследований установлено, что в предложенной системе возможно использование трех режимов и получено следующее:

- режим пьезотрансформатора представляется как фильтр низких частот;
- режим прямого пьезоэффекта представляется как селективный фильтр;
- генераторный режим представляется как фильтр высоких частот.

Построены передаточные функции, схемы замещения и АЧХ.

Режим прямого пьезоэффекта отличается простотой конструкции, максимальным эффектом, которого достигается работой на заданной паспортной частоте. Однако, под воздействием изменяющихся параметров окружающей среды могут изменяться параметры самого ПЭ и вследствие изменения резонансной частоты коэффициент усиления всей схемы может понизиться до такого порога, после которого полезный сигнал перестанет распознаваться системой.

Работа пьезотрансформаторного режима лежит в области низких частот и в области инфразвука. На частоте выше паспортной частоты резонанса ПЭ коэффициент усиления уменьшается до нуля. Установлено, что использование в режиме пьезотрансформатора ПЭ с минимальной толщиной имеет преимущество в большем диапазоне рабочей частоты и незначительном уменьшении коэффициента усиления.

Работа схемы построенной по генераторной схеме имеет линейный участок, начиная с паспортной частоты резонанса ПЭ – в области высоких частот и ультразвука. До этого участка характеристика зависит от добротности. Если использовать максимально-возможно тонкие конструкции ПЭ, то можно перейти в области, ниже частоты резонанса, где характеристика также имеет горизонтальный вид. С точки зрения

усиления сигнала генераторный режим лучше трансформаторного и прямого пьезоэффекта, однако, и сложнее в схемотехническом выполнении.

Перед выбором того или иного режима работы для интеграции разработанной компьютерной системы в натуральный объект дополнительно необходимо выполнение целого цикла исследований. Это связано с тем, что интеграция системы происходит в азимутальную винторулевою колонку, которая расположена в воде и испытывает влияние колебаний приходящих не только с установленного на судне оборудования, но и из водной среды. А в случае полупогружных плавучих буровых платформ, судов-кабелеукладчиков и трубоукладчиков суда испытывают дополнительные влияния на корпус и соответственно на АВРК. После исследования, какая область частот – инфразвук, ультразвук или звуковой диапазон, наиболее помехозащищена можно будет сделать рекомендации по выбору физических параметров ПЭ и по оптимальному режиму работы всей компьютерной системы на натурном объекте.

Кроме того, в работе проведен анализ функциональных свойств АБПЭ. Рассмотрены функциональные и схемотехнические модели исследуемых преобразователей. Изучены отклики на специальные воздействия (затухающий по экспоненциальной зависимости гармонический сигнал, а также импульс с крутым передним и спадающим по экспоненте задним фронтом), амплитудно-частотные, фазо-частотные и переходные характеристики АБПЭ.

## ГЛАВА 4

### МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТА КОАНДА

Для обработки информации поступающей с датчиков и преобразования ее в вид удобный для оператора в работе разработана компьютерно-интегрированная система фиксации отклонения судового валопровода под действием внешней силы.

Рассмотрим детальнее реализацию этой системы в судах с использованием размещения датчиков в узлах наибольшего напряжения с учетом полученных ранее теоретических положений.

#### **4.1 Компьютерно-интегрированная система определения эффекта Коанда с расположением датчиков в дейдвудном подшипнике**

Структурная схема разработанной системы показана на рис. рис. 4.1.

На рис. 4.1 представлена конструкция АВРК, в которой отклонение валопровода фиксируется комплектом пьезодатчиков  $D_1 - D_n$ . Полученные аналоговые сигналы от датчиков  $u_1(t) - u_n(t)$  преобразуются в цифровой вид (DWord). Далее сигнал поступает в блок обработки и анализа информации CPU/PLC – программируемый логический контроллер. Отсюда сигнал  $u(t)$ , следуя заданному алгоритму, передается в исполнительный механизм (ИМ). Также происходит передача информации по промышленному протоколу RS-485 в аппаратно-программную систему управления технологическими процессами (НМІ). Как правило, НМІ представляет собой компьютер с графическим дисплеем, где в наглядной форме отображается поведение системы, и пользователь имеет возможность вмешаться в деятельность системы. В промышленных условиях НМІ чаще всего реализуется с использованием типовых средств:

операторских панелей, компьютеров и типового программного обеспечения.

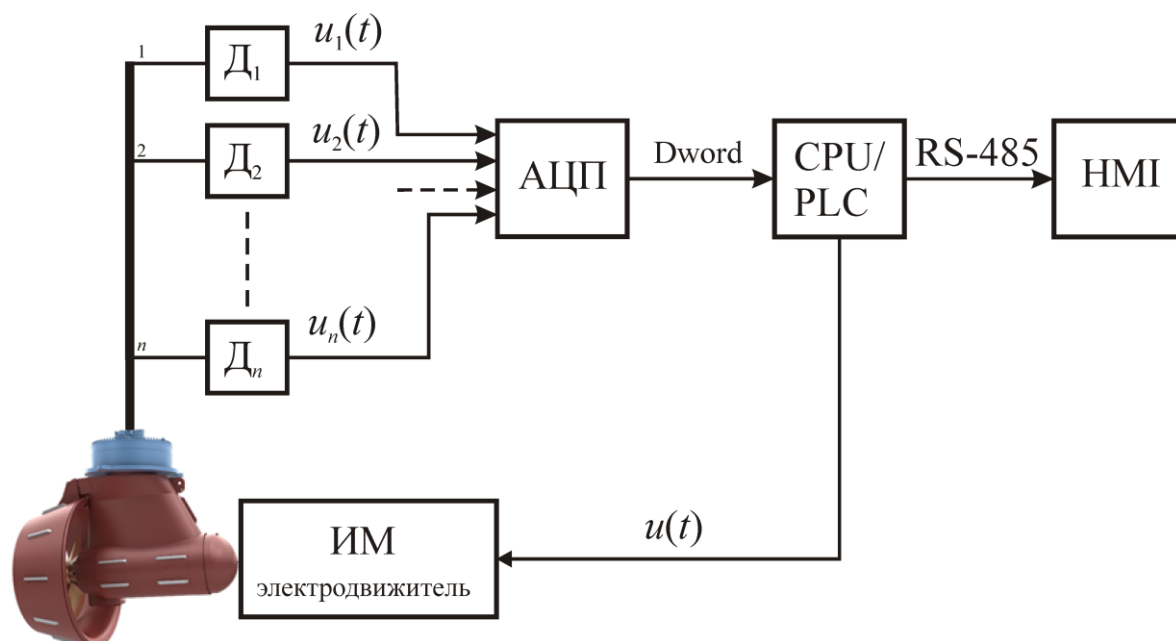


Рис. 4.1. Компьютерно-интегрированная система:  $D_1 \dots D_n$  – датчики; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; CPU/PLC – программируемый логический контроллер; ИМ – исполняющий механизм; HMI – Human Machine Interface

Автоматически направляется установка датчиков на окружности дейдвудного подшипника. Это могут быть как тензодатчики, так и пьезодатчики. Ранее нами были определены параметры пьезодатчиков.

В работе была разработана и запатентована судовая система винторулевой установки для предупреждения эффекта Коанда в которой пьезодатчики были расположены вдоль окружности дейдвудного подшипника валопровода винторулевой установки [6], которая представлена на рис. 4.2.

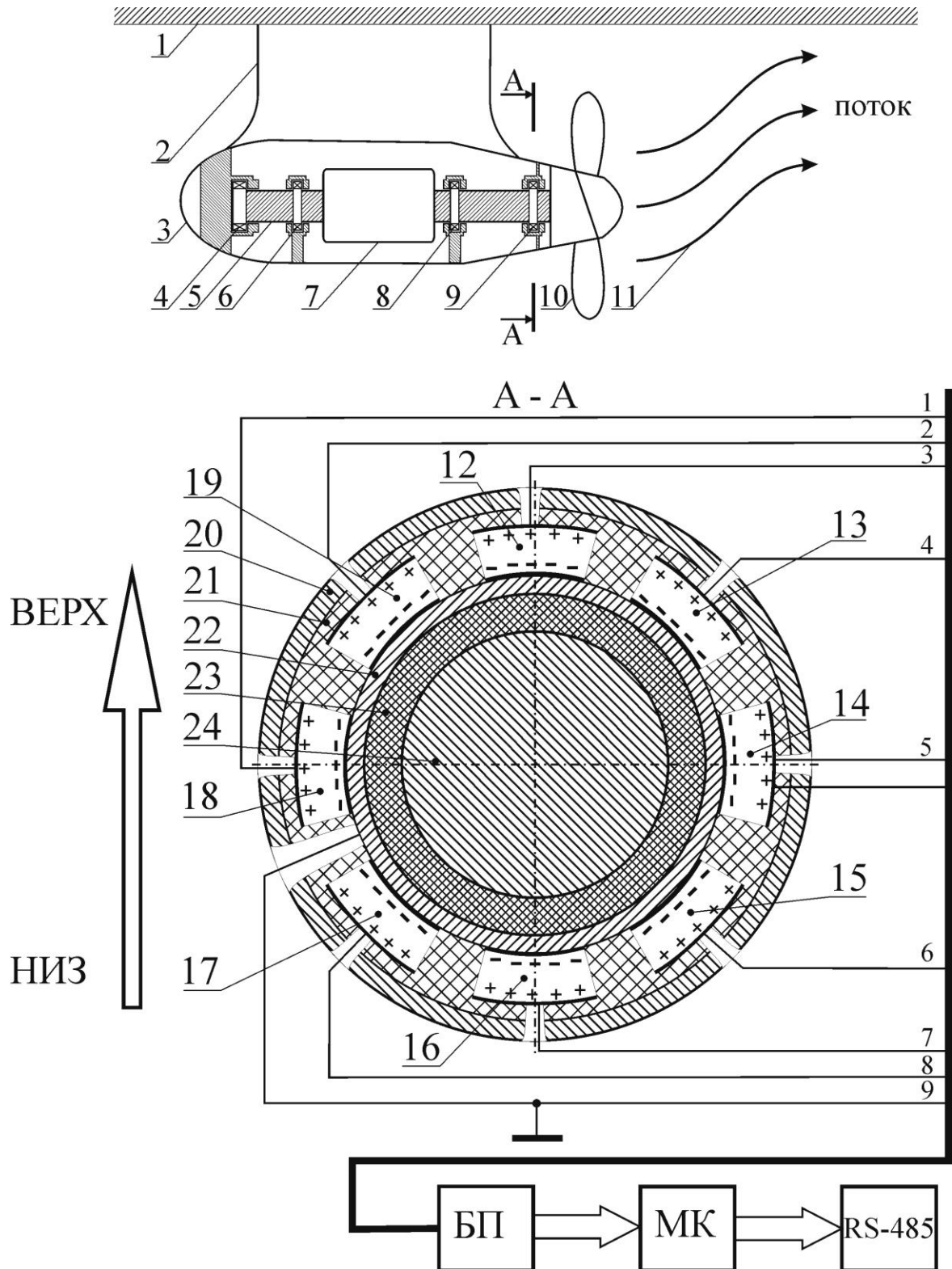


Рис. 4.2. Система с расположением пьезоэлектрических датчиков вдоль окружности дейдвудного подшипника валопровода АВРК

Данная система состоит: 1 – днище судна; 2 – баллер; 3 – силовая гондола; 4 – упорный подшипник; 5 – валопровод; 6 и 8 – опорные подшипники; 7 – механическое или электрическое устройство; 9 – дейдвудный подшипник; 10 – винт; 11 – направление потока воды.

При возникновении эффекта Коанда винт 10 с валопроводом 5 под действием потока воды 11 смещается вверх к днищу 1, что приводит к неравномерному износу дейдвудного 9, упорного 4 и опорных подшипников 6, 8.

В разрезе А–А рис. 4.2 изображена принципиальная схема системы. Данная схема состоит: 12 – 19 – пьезодатчики; 20 – корпус судна; 21 – диэлектрический слой; 22 – отрицательный полюс; 23 – дейдвудный подшипник; 24 – валопровод; БП – блок преобразователей; МК – микроконтроллер; RS-485 – интерфейс промышленного Ethernet.

Работа системы состоит из двух режимов:

- в состоянии покоя при отсутствии эффекта Коанда суммарное напряжение на электродах пьезодатчиков 12 – 19 равно нулю;
- в рабочем состоянии при возникновении эффекта Коанда суммарное напряжение на электродах пьезодатчиков не равно нулю.

В этом состоянии при возникновении эффекта Коанда валопровод 24 смещается вверх и давит на дейдвудный подшипник 23, который деформирует пьезодатчик 12.

Пьезодатчик преобразует механическую деформацию в электрический сигнал, который подается по шине данных через блок преобразователей БП на микроконтроллер МК и далее в промышленную сеть Ethernet.



## **4.2 Компьютерно-интегрированная система определения эффекта Коанда с расположением датчиков в точке крепления мотогондолы АВРК**

В предыдущем подразделе была описана предложенная и запатентованная "Судовая система мониторинга для предупреждения эффекта Коанда" [6], содержащая пьезодатчики, которые расположены вдоль окружности дейдвудного подшипника валопровода АВРК.

Недостатки системы, обусловленные использованием "Судовой системы мониторинга для предупреждения эффекта Коанда" заключаются в сложности интеграции пьезоэлектрических датчиков для регистрации отклонения валопровода в дейдвудный подшипник АВРК, которую следует проводить еще на этапе конструирования и строительства.

Для решения вышеизложенной задачи были проведены исследования [10, 11, 55, 56], по результатам которых нами предложена и запатентована судовая система определения состояния винто-рулевой установки для предупреждения эффекта Коанда, в которой пьезодатчики расположены в точках наибольшего напряжения – месте крепления винто-рулевой установки к корпусу судна (рис. 4.3).

На рис. 4.3 изображена АВРК, где *а)* – вид сбоку; *б)* – вид сверху, которая смонтирована на судне и направление потока воды при возникновении эффекта Коанда.

Система содержит: 1 – место крепления колонки АВРК; 2 – корпус судна; 3 – колонка АВРК; 4 – направление потока воды.

При возникновении эффекта Коанда колонка АВРК 3 под действием потока воды 4 выгибается вверх к корпусу судна 2, что вызывает деформацию узлов АВРК в следствии чего появляется неравномерный износ дейдвудного, упорного и опорных подшипников АВРК.

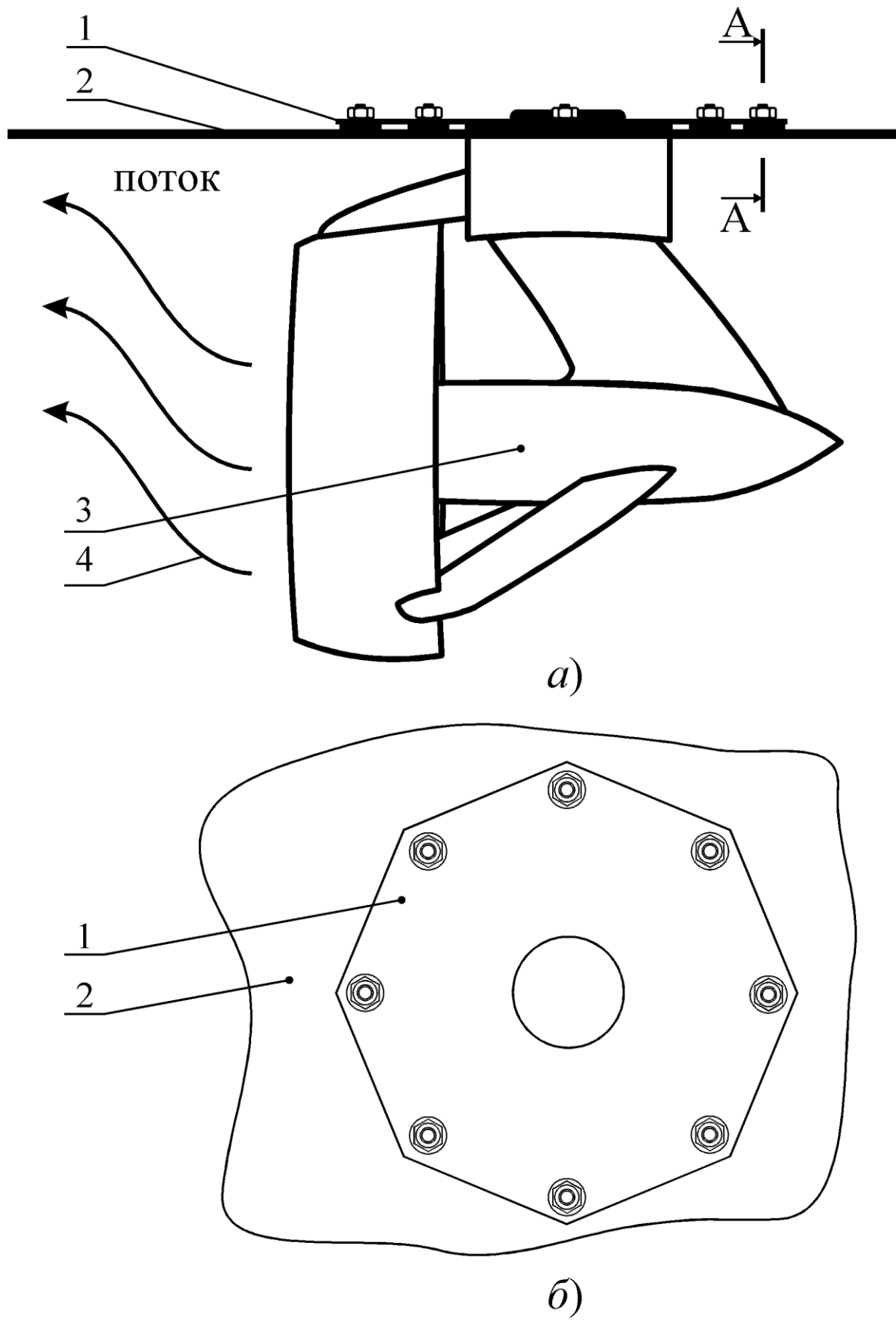


Рис. 4.3. Конструкция крепления АВРК

На рис. 4.4 в разрезе по А – А показан один из пьезодатчиков, смонтированных в месте крепления АВРК к корпусу судна.

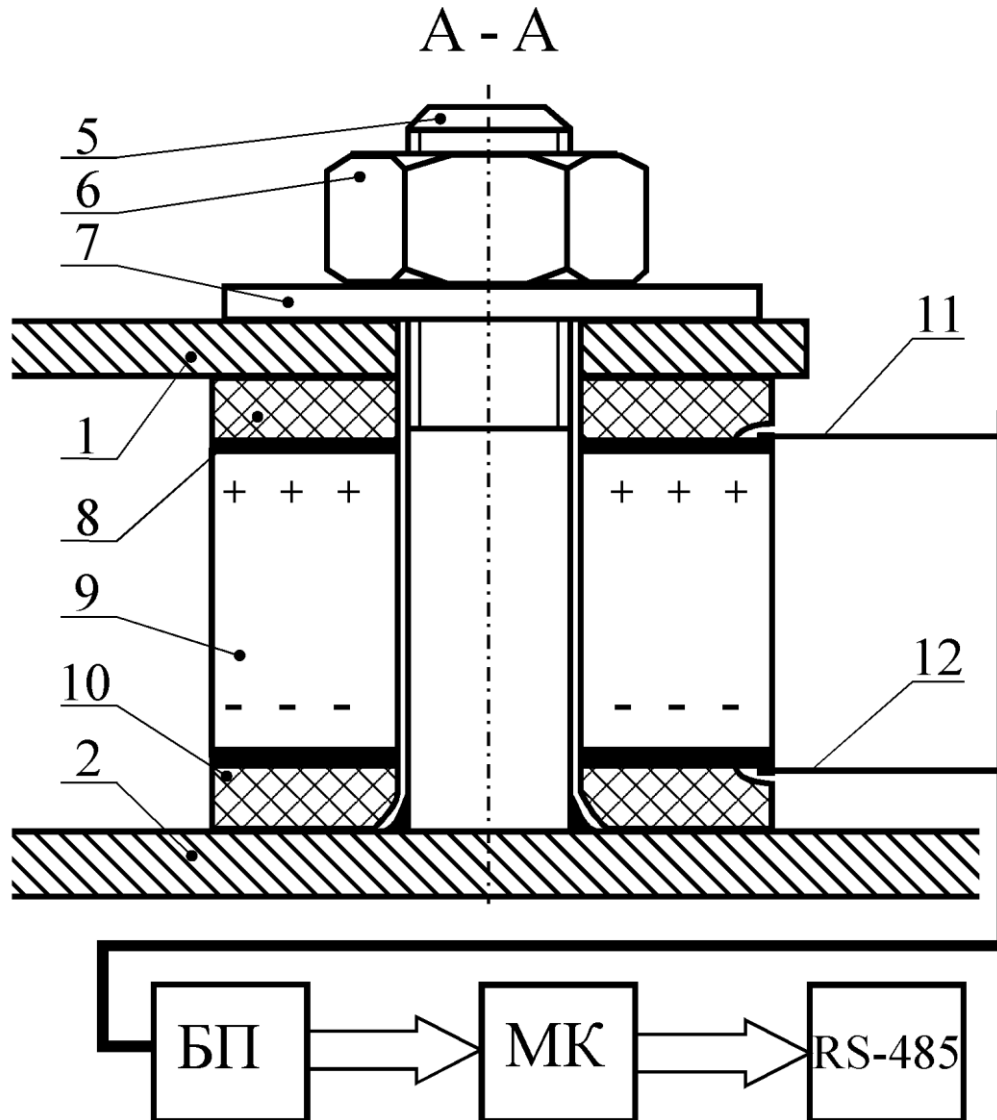


Рис. 4.4. Монтаж пьезодатчиков смонтированных в месте крепления АВРК к корпусу судна

Система содержит: 1 – крепление колонки АВРК; 2 – корпус судна; 5 – болт, который соединяет АВРК к корпусу судна; 6 – гайка; 7 – шайба; 8, 10 – прокладки из изолирующего материала; 9 – пьезодатчик; 11, 12 – положительный и отрицательный контакты пьезодатчика; БП – блок

преобразователей; МК – микроконтроллер; RS-485 – интерфейс промышленного Ethernet.

Работа состоит из двух режимов:

- в состоянии покоя при отсутствии эффекта Коанда напряжение на всех пьезодатчиках одинаково и равно нулю;

- в рабочем состоянии при возникновении эффекта Коанда колонка АВРК в месте крепления 1 испытывает поперечные колебания и начинает влиять на болт 5, стягивающий колонку АВРК с корпусом судна 2. Под действием этой силы пьезодатчик 9, который находится между ними деформируется, преобразуя механическую деформацию в электрический сигнал на контактах 11 и 12. Прокладки 8 и 10 из изолирующего материала служат также демпфирующим слоем, который предохраняет пьезодатчик от разрушения. Полученный электрический сигнал подается по шине данных через блок преобразователей БП на микроконтроллер МК и далее в промышленную сеть Ethernet.

### **4.3 Исследование работы опытного стенда**

Для регистрации и дальнейшего исследования момента возникновения эффекта Коанда был создан испытательный стенд, позволяющей в реальном времени фиксировать момент возникновения этого эффекта. В работе [6] была предложена такая система, структурная схема которой показана на рис. 4.5. Она состоит из пьезоэлектрических датчиков ПД1, ПД2, ..., ПД $n$  расположенных вокруг дейдвудного подшипника валопровода АВРК, блока АЦП и микроконтроллера МК с выдачей информации по интерфейсу RS-485.

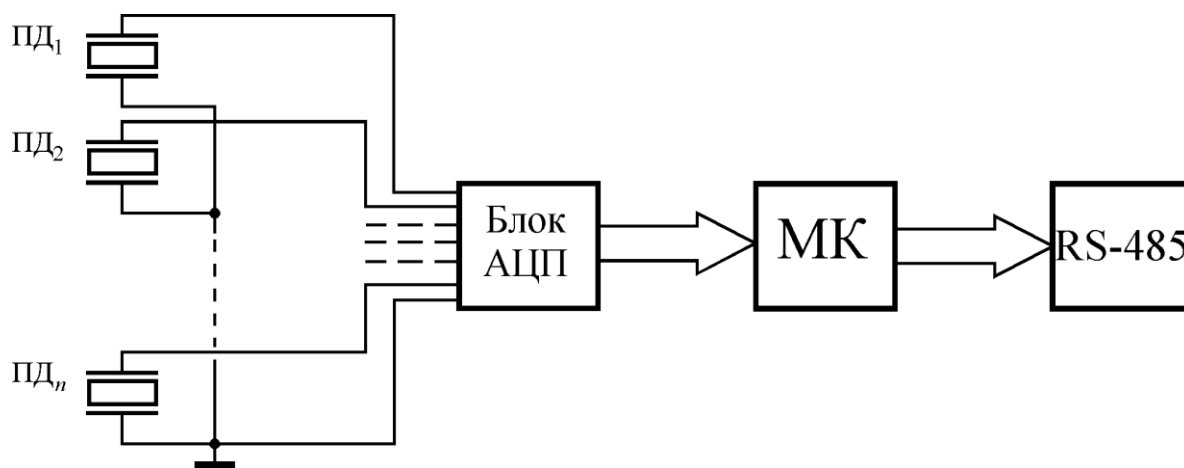


Рис. 4.5. Структурная схема системы определения состояния винторулевой колонки для предупреждения эффекта Коанда

Для реализации такой системы был собран макет (рис. 4.6), имитирующий момент возникновения эффекта Коанда при работе АВРК.

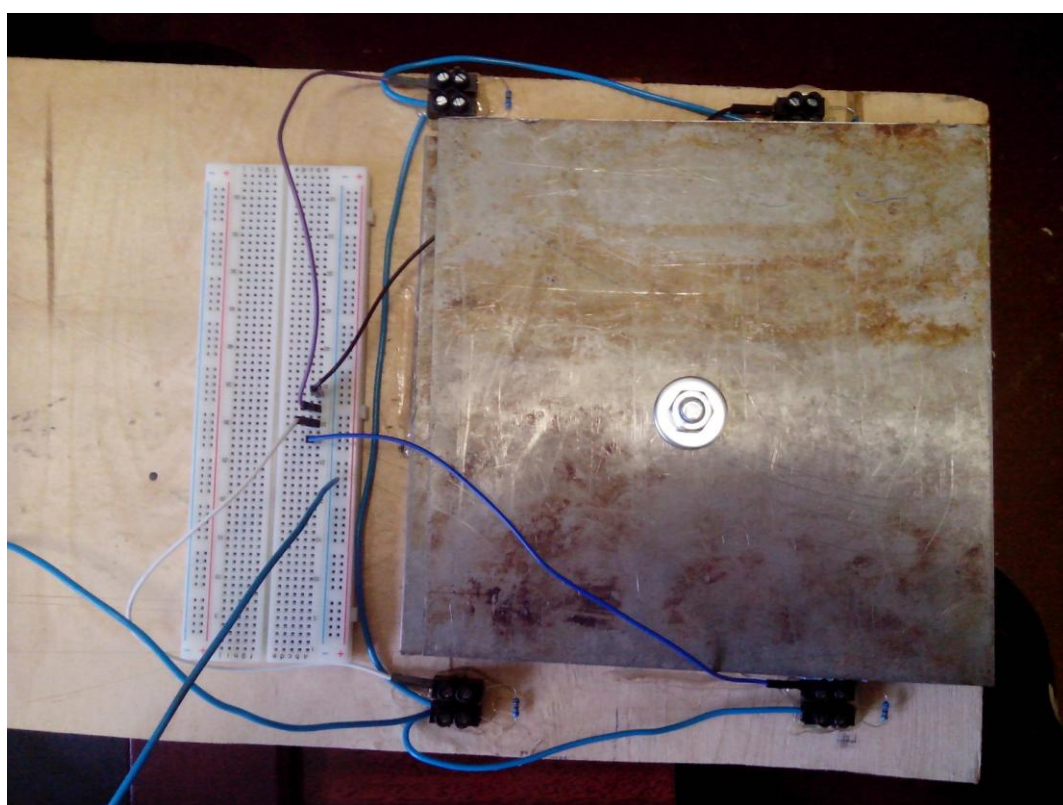
Данный макет состоит из двух квадратных стальных пластин. Нижняя пластина жестко соединена с корпусом и неподвижна. Верхняя пластина соединена с подвижным вертикальным штифтом. Между пластинами расположены пьезоэлектрические датчики. Общий минус пьезоэлектрических датчиков объединён на пластине с корпусом. Между верхней пластиной и датчиками расположены прокладки, выполняющие две функции: демпфирующую и изолирующую.

При работе штифт, выполняющий функции баллера АВРК, отклоняется от вертикальной позиции, что приводит к наклону верхней пластины. При этом расстояние между пластинами уменьшается, происходит деформация пьезоэлектрического датчика. Полученный в результате прямого пьезоэффекта сигнал передается на микроконтроллер для последующей обработки.

Работа была реализована на следующей элементной базе.



*a)*



*б)*

Рис. 4.6. Макет системы определения возникновения эффекта Коанда:

*a)* – вид сбоку; *б)* – вид сверху

В качестве датчиков были выбраны пьезоэлектрические датчики фирмы Керо Electronics типа MFT [57]. Количество датчиков было принято равным четырем для фиксации смещения валопровода в одно из четырех направлений – вверх, вниз, вправо или влево. В общем случае достаточно одного датчика, установленного сверху валопровода, который будет регистрировать "прилипание" потока воды к днищу. Однако известно, что на валопровод воздействуют непрерывно меняющиеся по величине и направлению периодические нагрузки. Под их воздействием в валопроводе возникают переменные деформации кручения и изгиба, возбуждающие в нём механические колебания [58]. Введение в систему нескольких датчиков позволит распознать возникновение крутильных и в меньшей мере изгибных колебаний и исключить эту информацию из обработки.

Подключение датчиков осуществляется по схеме, показанной на рис. 4.7. На основании этой схемы была собрана модель на четырех пьезоэлектрических датчиках и подключенных к контроллеру. Для вывода данных использовался стандартный ввод-вывод на монитор.

В качестве аппаратной части был выбран микроконтроллер AVR ATmega328 [59] фирмы Atmel Corporation имеющий характеристики представленные в табл. 4.2.

Дешевизна, простота конструкции и управления – его основные достоинства, которые используются для построения проектов начального уровня, отладки и получения результатов. Последующее внедрение на производстве происходит уже с использованием контроллеров промышленной автоматизации.

Проанализируем подробнее характеристики, повлиявшие на выбор этого микроконтроллера.

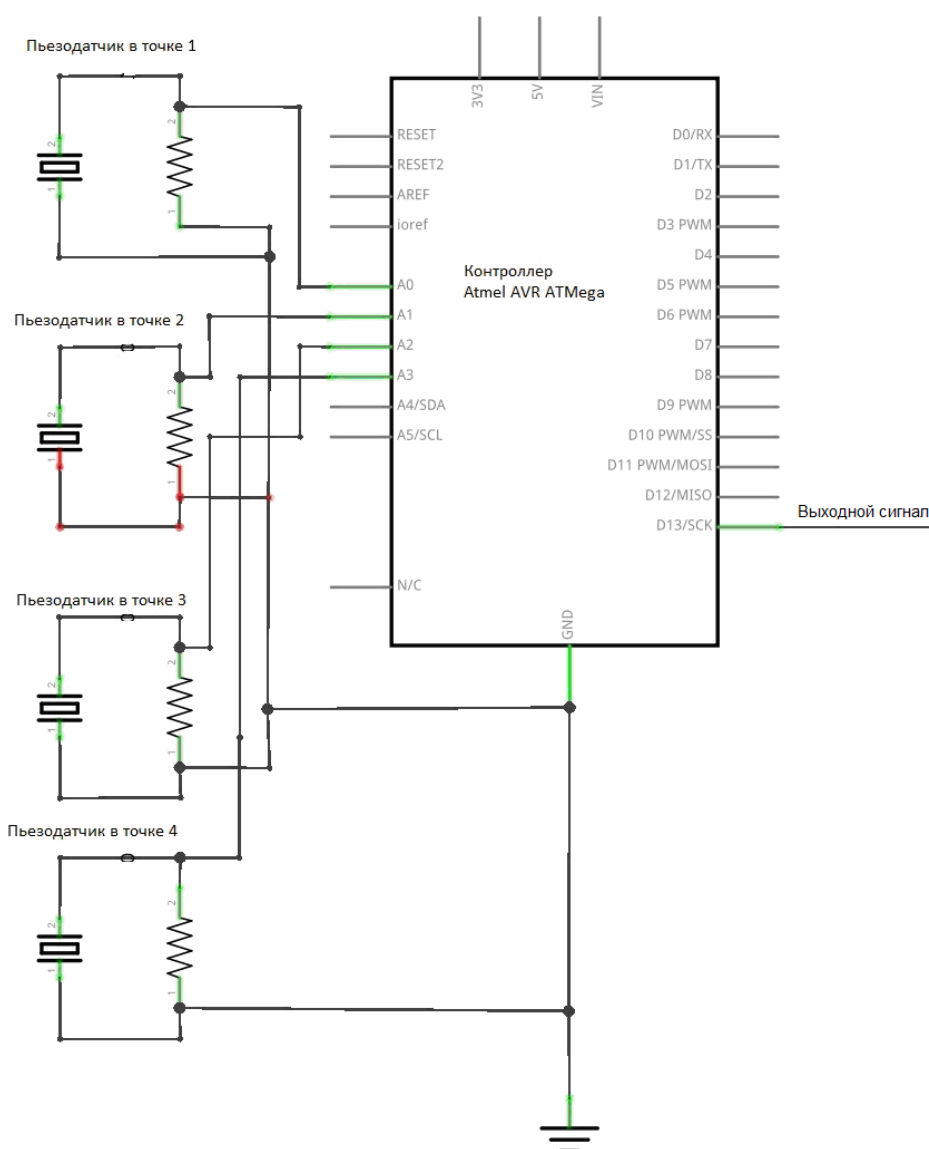


Рис. 4.7. Схема подключения датчиков к микроконтроллеру Atmel AVR ATmega

Рабочее напряжение 5 В (в отличие от 24 В принятых в промышленных микроконтроллерах) в сумме с малым энергопотреблением позволило организовать мобильное питание на макете.

В контроллере реализованы 6 аналоговых входов, каждый разрешением 10 бит (т.е. может приниматься 1024 различных значений), которые позволили обойтись без внешнего блока АЦП.



Таблица 4.2

## Технические характеристики микроконтроллера ATmega328

Характеристики	Значение
тактовая частота	16 МГц
рабочее напряжение	5 В
рабочий ток	25 мА
цифровые входы / выходы	14
аналоговые входы	6
флеш-память	32 Кб
ОЗУ	2 Кб

Для осуществления связи с компьютером, другими устройствами или микроконтроллерами ATmega328 поддерживает последовательный интерфейс UART TTL (5 В) для чего используется микросхема ATmega8U2. Она направляет информацию через USB, эмулируя виртуальный COM порт. Прошивка ATmega8U2 использует стандартные драйверы USB COM. Микроконтроллер ATmega328 поставляется с записанным загрузчиком, облегчающим запись новых программ без использования внешних программаторов. Связь осуществляется оригинальным протоколом STK500 [60].

Система команд микроконтроллеров AVR весьма развита и насчитывает в различных моделях от 90 до 133 различных инструкций. Большинство команд занимает только 1 ячейку памяти (16 бит) и выполняется за 1 такт. Всё множество команд микроконтроллеров AVR можно разбить на несколько групп:

- команды логических операций;
- команды арифметических операций и команды сдвига;
- команды операции с битами;
- команды пересылки данных;
- команды передачи управления;

– команды управления системой.

Исходя из полученной схемы управления и конфигурации датчиков составляем алгоритм управления, блок-схему и пишем программу управления.

Алгоритм управления следующий:

1. Устанавливаем значение состояния в позицию нормального.
2. Принимаем допустимый порог аварийности в 90% от номинального.
3. Считываем аналоговые данные с первого пьезодатчика.
4. Преобразовываем аналоговые данные с первого пьезодатчика в цифровой сигнал.
5. Если считанные данные с первого пьезодатчика больше допустимого порога, то устанавливаем значение состояния в позицию аварийного.
6. Считываем аналоговые данные со второго пьезодатчика.
7. Преобразовываем аналоговые данные со второго пьезодатчика в цифровой сигнал.
8. Если считанные данные со второго пьезодатчика больше допустимого порога, то устанавливаем значение состояния в позицию аварийного.
9. Считываем аналоговые данные с третьего пьезодатчика.
10. Преобразовываем аналоговые данные с третьего пьезодатчика в цифровой сигнал.
11. Если считанные данные с третьего пьезодатчика больше допустимого порога, то устанавливаем значение состояния в позицию аварийного.
12. Считываем аналоговые данные с четвертого пьезодатчика.
13. Преобразовываем аналоговые данные с четвертого пьезодатчика в цифровой сигнал.
14. Если считанные данные с четвертого пьезодатчика больше

допустимого порога, то устанавливаем значение состояния в позицию аварийного.

15. Передаем значение состояния на выход.

16. Если состояние в позиции аварийного, то устанавливаем таймер на заданное значение, иначе переходим на шаг 3.

17. По истечению таймера считываем аналоговые данные с датчиков. Если состояние нормальное, то переходим на шаг 1. Иначе переходим на шаг 16.

Блок-схема представлена на рис. 4.8.

Открытая архитектура AVR-микроконтроллеров обусловила доступность большого числа инструментальных средств проектирования, поставляемых, как непосредственно корпорацией Atmel, так и сторонними производителями. В проекте была использована интегрированная среда разработки [61], показанная на рис. 4.9, позволяющая писать программы на простом языке по образцу языка Processing [62].

Управление периферийными устройствами осуществляется через адресное пространство данных. Для удобства существуют "сокращённые команды" IN/OUT. Мониторинг последовательной шины (Serial Monitor) позволяет посылать и получать текстовые данные при подключении к платформе.

На рис. 4.10 показан результат работы стенда. На отображаемой информации выводится номер сработавшего пьезоэлектрического датчика и уровень сигнала, который соответствует приложенному давлению.

Таким образом, в работе представлен предложенный программно-технический комплекс системы определения эффекта Коанда, позволяющий зафиксировать момент возникновения данного эффекта и передать информацию в систему управления пропульсивным комплексом.

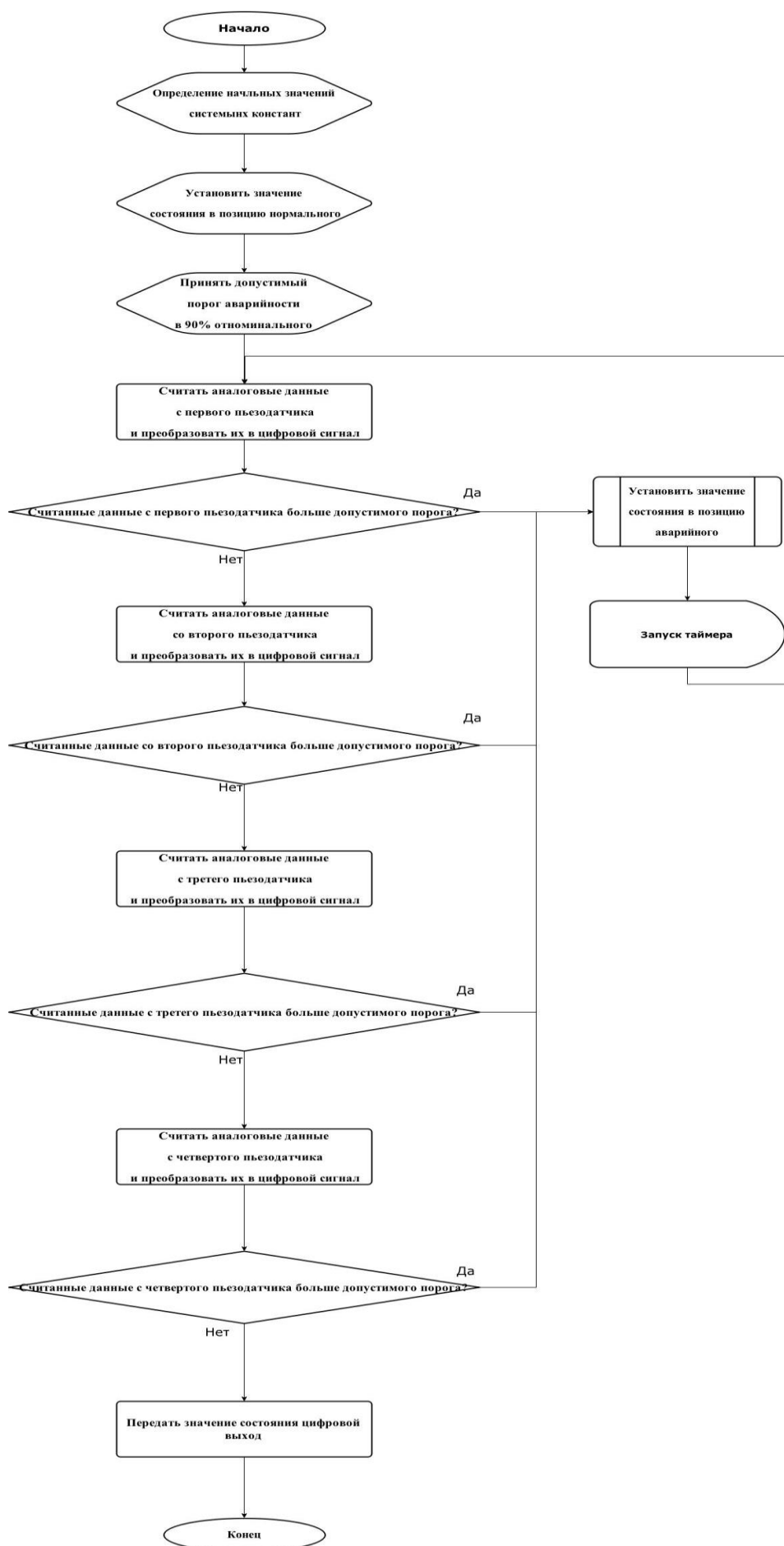


Рис. 4.8. Блок-схема

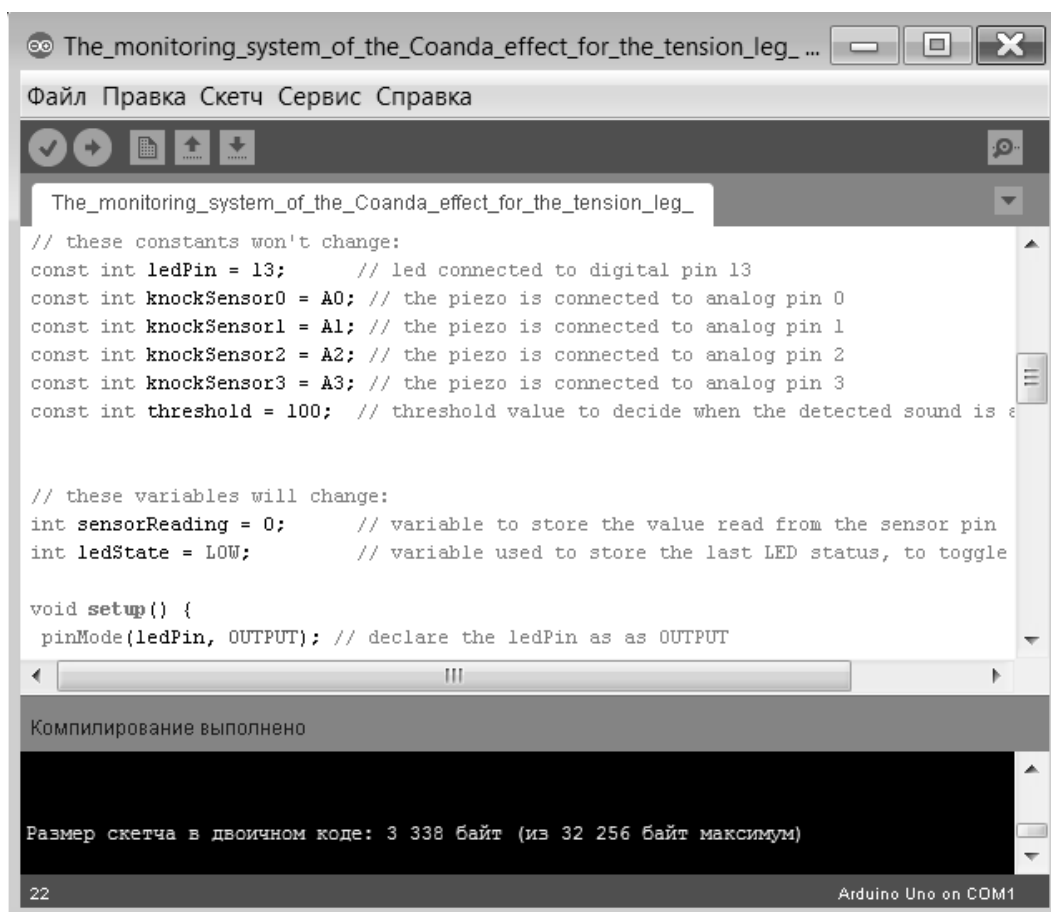


Рис. 4.9. Интерфейс программного обеспечения

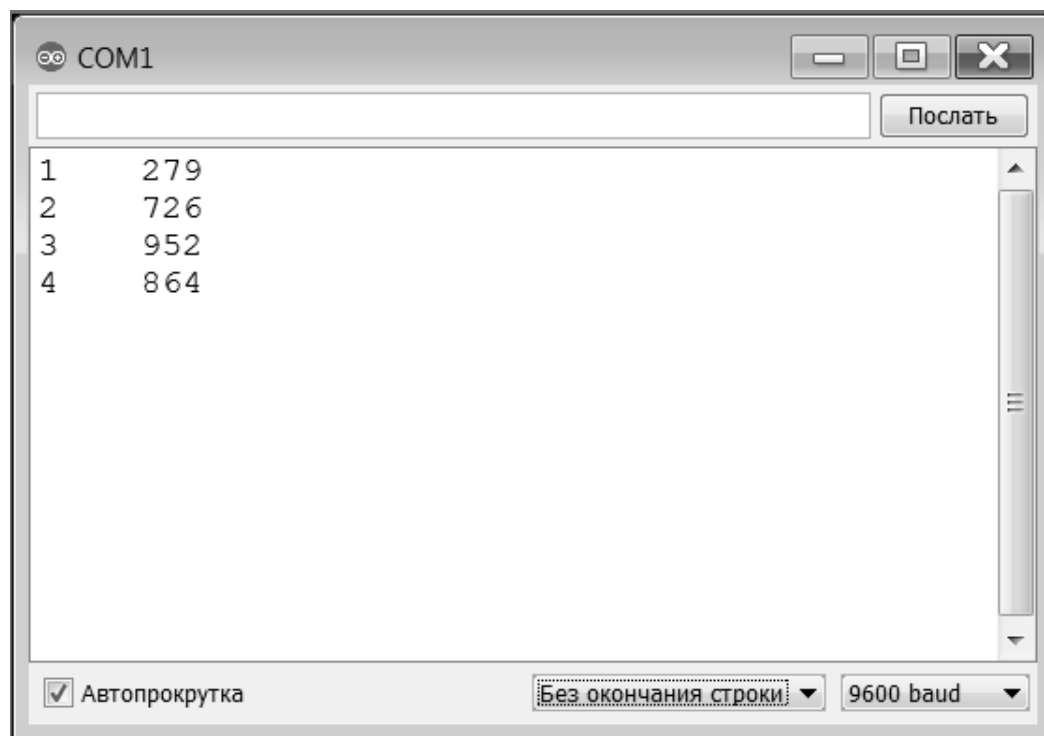


Рис. 4.10. Интерфейс Serial Monitor

#### 4.4 Исследование работы системы на натурной модели многофункциональной платформы

В Национальном университете "Одесская морская академия" на кафедре технической эксплуатации флота под руководством В.В. Будашко создана действующая натурная модель (рис. 4.11), позволяющая проводить исследования по повышению эффективности функционирования судовых энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов, одним из разделов которой является выработка алгоритмов и способов противодействия эффекту Коанда путем изменения режимов работы пропульсивной установки.



Рис. 4.11. Кормовой пропульсивный комплекс (вид сбоку)

На платформе установлено шесть азимутальных винторулевых колонок, в том числе с двумя степенями свободы (рис. 4.12), и одно туннельное подруливающее устройство.



Рис. 4.12. Азимутальная винторулевая колонка с двумя степенями свободы

Универсальность данной модели достигается за счет включения в систему тех или иных винторулевых устройств. Таким образом, может выполняться моделирование работы большой номенклатуры судов, оснащенных АВРК и подверженных в процессе своей эксплуатации эффекту Коанда [12], а именно:

- судов снабжения;
- буксиров-якорезаводчиков;
- судов-кабелеукладчиков и трубоукладчиков;
- судов сейсмической разведки;
- буровых судов и мобильных буровых платформ;
- судов обеспечения водолазных работ;
- земснарядов;
- шаттл-танкеров;
- пассажирских судов;
- стартовых ракетных комплексов (морской старт);
- ледоколов;
- научных судов.

На рис. 4.13 представлен чертеж универсальной платформы с физическими размерами.

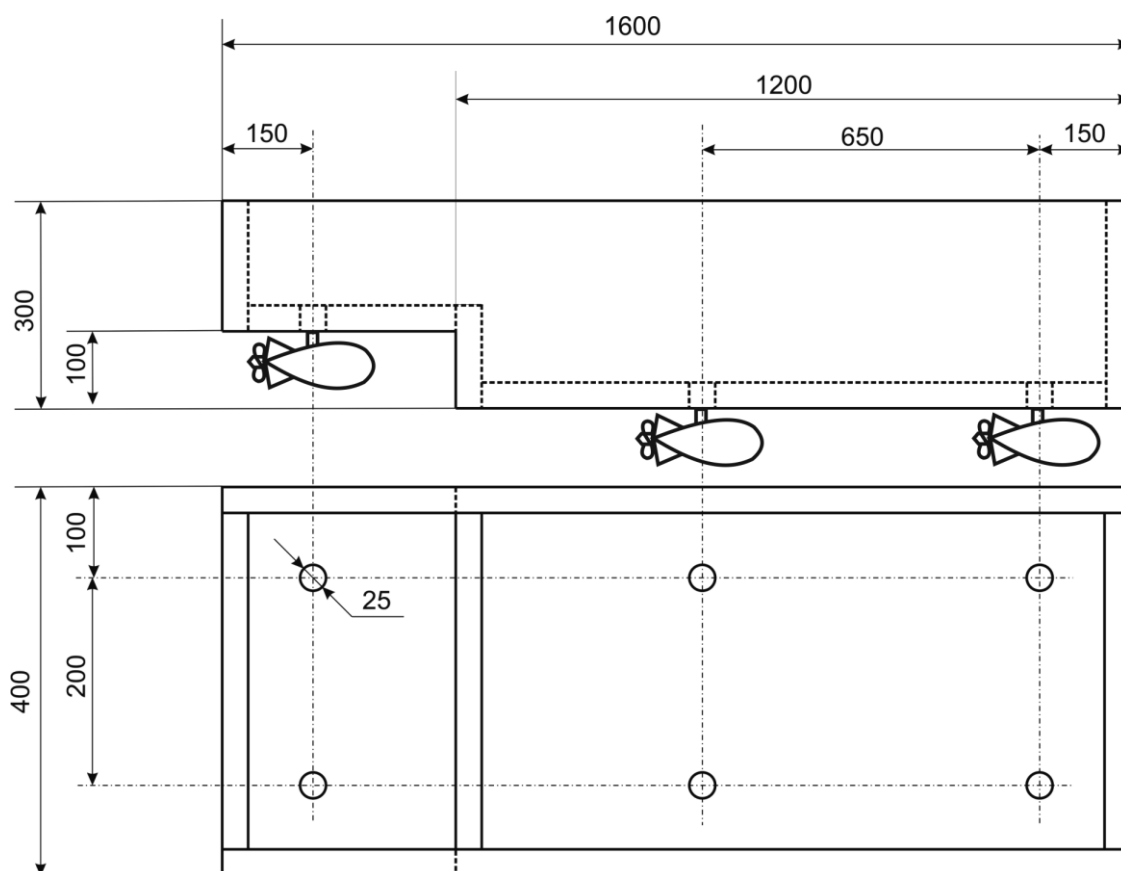


Рис. 4.13. Чертеж многофункциональной платформы с размерами

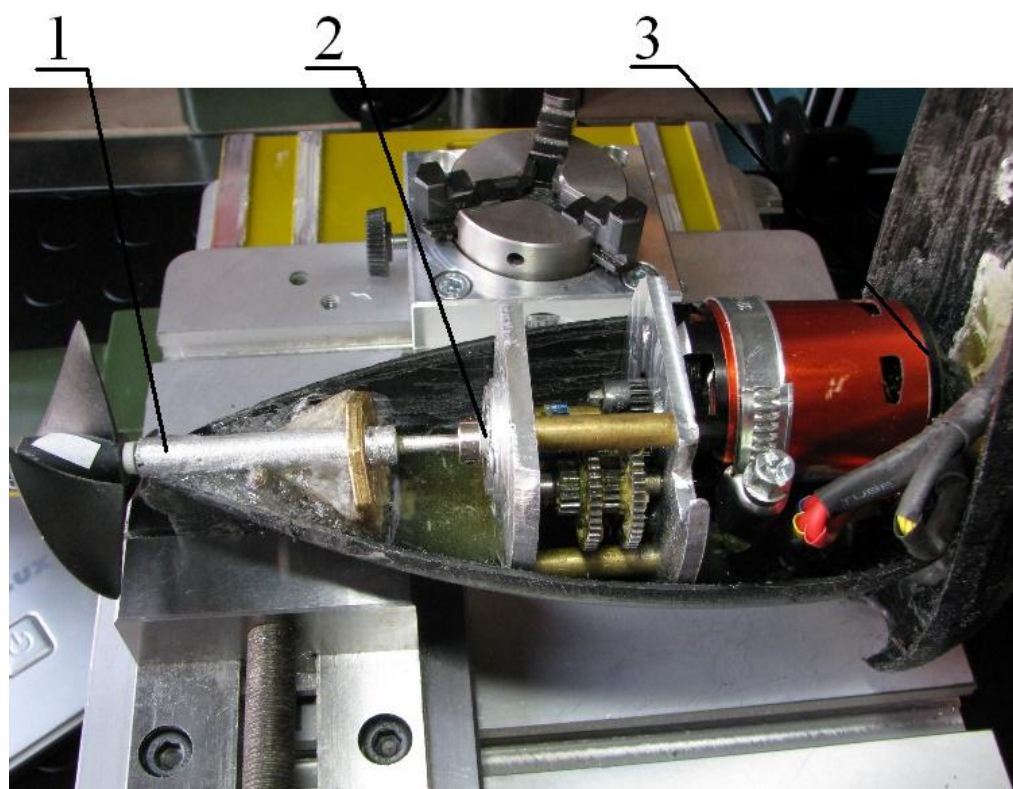
Были проведены замеры потоков воды расходомером компании General Tools модель Flow Watch FW450 [63], создаваемым пропульсивным комплексом АВРК (рис. 4.14).

В модели АВРК были использованы следующие компоненты, подверженные риску повышенного износа вследствие возникновения эффекта Коанда: в дейдвуде установлен подшипник радиальный MR63ZZ EZO 3×6×2,5 нерж. – 2 шт.; промежуточные радиальные подшипники (1 между дейдвудом и двигателем, 1 между двигателем и задней стенкой, упорный) SMR117ZZ EZO 3×9×7 нерж. – 2 шт.; на баллере – подшипник радиальный 180202AC17/6202 2RS 15×35×11 – 1 шт.





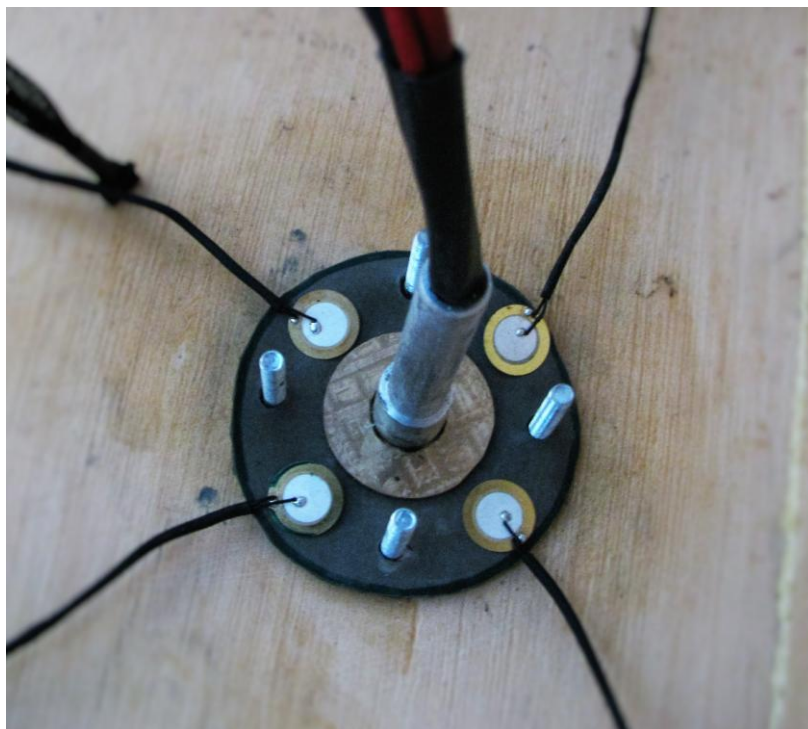
*a)*



*б)*

Рис. 4.14. Расположение элементов в АВРК: *a)* – внешний вид мотогондоллы;  
*б)* – внутренняя конструкция; 1 – дейдвудный подшипник; 2 – опорный подшипник; 3 – упорный подшипник

Нами были проведены исследования [6, 7] по выбору места расположения датчиков. Пьезоэлементы были смонтированы на натурную модель (рис. 4.15) в место крепления мотогондоллы к корпусу судна.



*a)*



*б)*

Рис. 4.15. Этапы монтажа пьезоэлементов на натурной модели: *a)* – монтаж ПЭ; *б)* – колонка в сборе

Количество датчиков было принято равным четырем – для фиксации смещения валопровода в одну из четырех направлений: вверх, вниз, вправо или влево. Для регистрации возникновения эффекта Коанда достаточно внедрения в систему одного датчика – чтобы зарегистрировать сам момент его возникновения при смещении валопровода к днищу судна. Однако, возникающие в валопроводе крутильные и изгибные колебания [58], несут "ложные" сигналы, которые могут быть зарегистрированы системой как "полезный" сигнал. Для этого введены несколько датчиков, которые будут отсеивать ложную информацию.

В качестве опытного образца были взяты пьезоэлементы фирмы Керо Electronics [57] типа MFT.

Для проведения дальнейших исследований была собрана схема, представленная на рис. 4.16. Аппаратная часть была реализована с помощью аппаратных модулей, разработанных группой университетов в рамках проекта TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU [13].

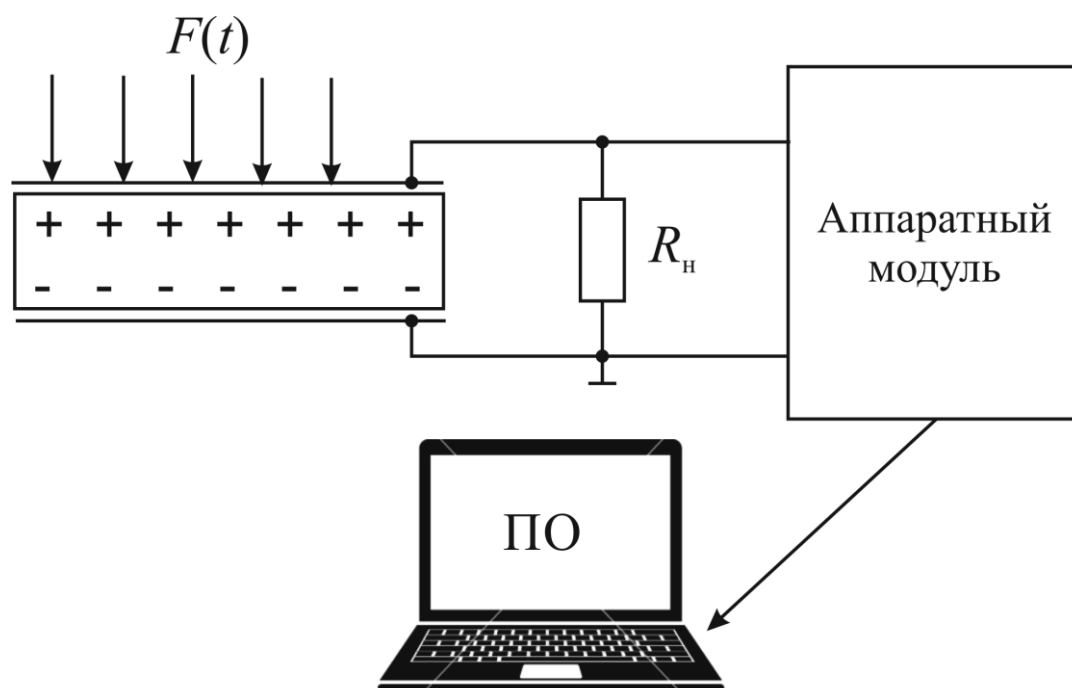


Рис. 4.16. Структурная схема эксперимента

При предварительных испытаниях натурной модели и симуляции эффекта Коанда отклонение валопровода АВРК [10] под действием силы 300 кгс·м привело к получению сигнала на пьезоэлементах. Измерения проводились с помощью осциллографа Nantek 1008 со следующими характеристиками:

- количество каналов 8;
- импеданс 1 Мегаом 25пФ;
- диапазоны 10 мВ – 5 В, 8 шагов;
- временные диапазоны 1 нс/деление – 20000 с/деление;
- размер буфера 4 КБ;
- полоса 100 кГц;
- частота дискретизации (выборки в секунду) 2,4 МГц на 1 канал (300 кГц при 8 каналах);
- максимальное напряжение на входе 35В.

Осциллограммы зафиксированного сигнала отображены на рис. 4.17.

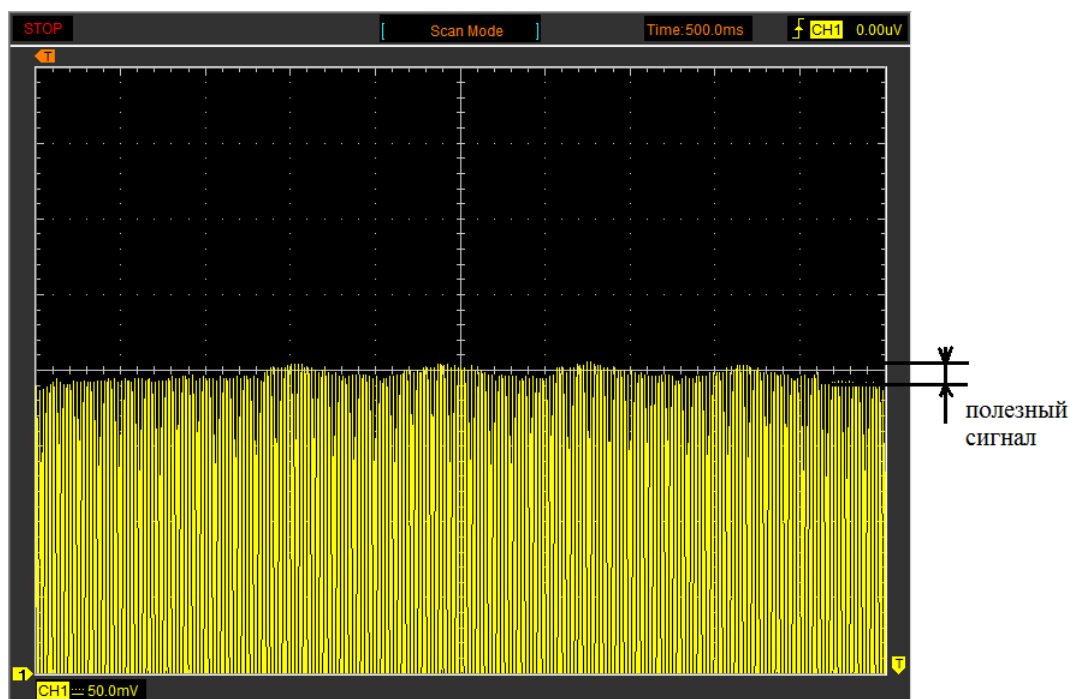


Рис. 4.17. Осциллограмма снимаемого с пьезоэлементов сигнала при возникновении эффекта Коанда

Как видно из осциллограмм, пики приходятся на моменты отклонения баллера АВРК. Однако особенностью пьезоэлемента, работающего в следящем режиме в том, что при времени переходного процесса более 2 с полезный сигнал может быть не зафиксирован системой. Поэтому для надежной фиксации момента отклонения валопровода будет оптимальным использование генераторного режима или пьезотрансформаторного по напряжению.

#### **4.5. Выводы к главе 4**

1. Разработана компьютерно-интегрированная система определения эффекта Коанда с расположением датчиков в дейдвудном подшипнике. Определены недостатки такой системы, которые заключаются в сложности интеграции пьезоэлектрических датчиков для регистрации отклонения валопровода в дейдвудный подшипник АВРК, необходимые проводить еще на этапе конструирования и строительства.

2. Разработана компьютерно-интегрированная система определения эффекта Коанда с расположением датчиков в точке крепления мотогондоллы АВРК.

3. Разработан испытательный стенд, позволяющей в реальном времени фиксировать момент возникновения эффекта Коанда. Получена структурная схема системы определения состояния винторулевой колонки для предупреждения эффекта Коанда. Проведено исследование конструкции стенда имитирующего отклонение баллера АВРК на основе микроконтроллера фирмы Atmel. Написано программное обеспечение и получены числовые результаты с каждого из датчиков при отклонении баллера АВРК.

4. Проведена инсталляция датчиков в многофункциональную платформу, включающую в себя шесть АВРК. Получены осциллограммы с датчиков при отклонении АВРК.

## ВЫВОДЫ

В диссертации, на основе выполненных автором исследований, решена важная научно-техническая задача повышения безопасности эксплуатации азимутальной винто-рулевой колонки, которая способствует уменьшению затрат на эксплуатацию судов торгового и военно-морского флотов.

В результате выполненных автором исследований был выявлен ряд закономерностей, анализ которых позволяет утверждать, что сформулированные в работе задачи могут считаться выполненными. При выполнении работы были использованы корректные и достоверные методы исследования.

В работе получены следующие основные научные и практические результаты.

Разработанный метод определения мест наибольшей напряженности АВРК, что позволяет размещать компоненты компьютерной системы (пьезопреобразователи) в местах с наибольшей чувствительностью для определения возникновения эффекта Коанда. Проведенный анализ конструкций АВРК позволил определить, что избыточные напряжения, кроме подшипников винтовой группы, возникающие на Баллере руля и платформе крепления АВРК к корпусу судна, определяет количество мест установки датчиков.

Построены модели и определены физические параметры и характеристики первичных биморфных пьезокерамических преобразователей, входящих в состав компьютерной системы определения эффекта Коанда. Разработанные модели позволяют провести оптимальный выбор конструкций компонентов компьютерной системы.

Полученные функциональные и схематехнические модели биморфных пьезоэлементов, которые используются для определения

эффекта Коанда. Изучены амплитудночастотные, фазочастотных и переходные характеристики, а также рассмотрены реакции на воздействия специальной формы. С помощью критерия Найквиста рассмотрена устойчивость системы. Соответствие характеристик функциональных и схемотехнических моделей подтверждает адекватность полученных моделей.

Разработан стенд для натурных испытаний, который позволил подтвердить правильность выбранного направления и в дальнейшем интегрировать компьютерно-интегрированную систему определения эффекта Коанда в натурную модель многофункциональной платформы.

Синтезирована компьютерная система определения эффекта Коанда в АВРК, что позволяет судоводителям и механикам оперативно отрабатывать начало потери упора винта, которая, в свою очередь, может достигать 15%.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс: при проведении учебных занятий по специальностям "Автоматизированное управление технологическими процессами" и "Эксплуатация судовых энергетических установок" в Национальном университете "Одесская морская академия".

Успешное решение поставленной научно-технической задачи способствует решению важной проблемы обеспечения безопасности судовождения, что ведет к уменьшению количества аварийных случаев и, как следствие, к снижению опасности человеческой жизни, окружающей среды и имущества.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The SCHOTTEL Rudderpropeller. From brilliant invention to global classic [Электронный ресурс]. – <http://www.schottel.de/marine-propulsion/srp-rudderpropeller/>.
2. Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., Mitescu C.D. Physical Hydrodynamics. – Oxford University Press, – 2001. – 505 p.
3. Peter Lehner, Bob Deans In Deep Water: The Anatomy of a Disaster, the Fate of the Gulf, and How to End Our Oil Addiction. – New York: "OR Books", – 2010. – 173 p.
4. Представление движителей Azipod® серии VI [Электронный ресурс]. – [http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/908eb000f6546300c12577e5004191aa/\\$file/azipod\\_vi\\_project\\_guide\\_ru.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/908eb000f6546300c12577e5004191aa/$file/azipod_vi_project_guide_ru.pdf).
5. Maciel P., Koop A., Vaz G. Modelling Thruster-Hull Interaction with CFD // Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – OMAE2013. – June 9 – 14, 2013.
6. Пат. 100819 Україна, МПК G01L 9/08, 5/12, 1/16. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда / В.В. Будашко, В.В. Нікольський, С.Г. Хнюнін. – № u201501854; заявл. 02.03.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.
7. Пат. 107006 Україна, МПК G01L 9/08, 5/12, 1/16. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда / В.В. Будашко, В.В. Нікольський, С.Г. Хнюнін. – № u201512962; заявл. 28.12.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9.

8. Никольский В.В., Хнюнин С.Г. Использование пьезоэлектрического трансформатора в системах микроклимата судовых помещений // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2012. – Вып. 18. Одесса: ОНМА. – С. 87 – 92.

9. Ковальков В.И., Никольский В.В., Хнюнин С.Г. Измеритель динамических параметров электронных устройств // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2013. – Вып. 19. Одесса: ОНМА. – С. 33 – 39.

10. Будашко В.В., Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Накул Ю.А. Система мониторинга состояния винторулевой колонки для предупреждения эффекта Коанда // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 22 – 28.

11. Никольский В.В., Будашко В.В., Хнюнин С.Г., Раенко Н.Е. Система мониторинга позиционирования полупогружных плавучих буровых установок // Судовые энергетические установки: науч. -техн. сб. – 2015. – № 35. – Одесса: ОНМА. – С. 137 – 141.

12. Vitaliy Budashko, Vitaliy Nikolskyi, Oleg Onishchenko, Sergii Khniunin Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 3/8 (81). – P. 10 – 21.

13. Горб С.И., Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Шапо В.Ф. Техническое обеспечение подготовки судовых инженеров по системам автоматизации с программируемыми контроллерами // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ "ОМА". – С. 39 – 46.

14. Contra-rotating Azipod propulsion selected for Japanese fast ferries // The Naval Architect, June 2003, p. 6.
15. Highly manoeuvrable CRP Azipod solution for big boxships // MER, Oct. 2001, pp. 43 – 44.
16. Kurimo R., Poustoshniy A. V., Syrkin E. N. Azipod propulsion for passenger cruisers // NAV & HSMV International Conference, Sorrento, 18 – 21 March 1997.
17. IB Röthelstein, river icebreaker with Azipod propulsion for Österreichische Donaukraftwerke AG // Ship & Boat, June 1995.
18. The complete propulsion unit [Электронный ресурс]. – [http://www.schottel.de/fileadmin/data/pdf/eng/NAV\\_EN\\_0814\\_web.pdf](http://www.schottel.de/fileadmin/data/pdf/eng/NAV_EN_0814_web.pdf).
19. Final Report on the Investigation of the Macondo Well Blowout // Deepwater Horizon Study Group, March 1, 2011 [Электронный ресурс]. – [http://ccrm.berkeley.edu/pdfs\\_papers/bea\\_pdfs/dhsgfinalreport-march2011-tag.pdf](http://ccrm.berkeley.edu/pdfs_papers/bea_pdfs/dhsgfinalreport-march2011-tag.pdf).
20. Алфимов В.Н. и др. Судовые тяговые расчеты. - М.: Транспорт, 1970. 224 с.
21. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. – Л.: Судостроение, 1976. – 478 с.
22. Завьялов А.А., Небесное В.В. Расчет и построение паспортной диаграммы пропульсивной установки судна с ВРШ // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. - 2003. - Вып. 8. - Одесса: ОНМА. - С. 100 - 103.

23. Завьялов А.А., Небесное В.В, Тяговые возможности транспортного судна при буксировке // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. - 2003. - Вып. 9. - Одесса: ОНМА. - С. 69 - 73.

24. Камкин СВ., Возницкий И.В., Шмелев В.П. Эксплуатация судовых дизелей: Учебник для ВУЗов. - М.: Транспорт, 1990. - 344 с.

25. Колесник Д.В. Тенденции развития пропульсивных комплексов судов, эксплуатирующихся во внутренних водных путях / Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. - 2005. - № 14. - Одесса: ОНМА. - С. 45 - 49.

26. Колесник Д.В. Влияние скоса потока на гидродинамические характеристики судовых винторулевых колонок // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. - 2005. - № 15. - Одесса: ОНМА. - С. 32 - 36.

27. Правила технической эксплуатации морских и речных судов КНД 31.2.002.-96. - Министерство транспорта Украины, 1996.

28. Справочник судового механика по теплотехнике / И.Ф. Кошелев, АИ. Пилюшенко, Г.А. Попов, В.Я. Тарасов. - Л.: Судостроение, 1981. - 480с.

29. Ходкость и управляемость судов: Учебник для ВУЗов / Под ред. В.Г. Павленко. - М.: Транспорт, 1991. - 397 с.

30. ReFRESCO Versions & features [Электронный ресурс]. – <http://www.refresco.org/resources/versionsfeatures/>.

31. Алексеева Т. В. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева, В. Д. Бабанская, Т. М. Башта, и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.

32. ЯКУТ.12-001–97. Сборник инструкций по браковочным показателям всех видов смазочных и гидравлических масел, применяемых на судах морского флота: нормативный документ. – Введ. 15.04.1997. – Л.: ЦНИИМФ, 1997. – 34 с.

33. Standard document 3AFV6001116 ABB Oy Marine and Turbocharging. Maintenance Instruction Propeller and thrust bearing oil sampling instruction.

34. ГОСТ 2477–65 (СТСЭВ 2382–80). Нефтепродукты. Метод определения содержания воды. – Введ. 01.01.1966. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 47 с.

35. ISO 12937:2000. Petroleum products. Determination of water. Coulometric Karl Fisher titration method.

36. ГОСТ 17216–2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей.

37. ISO 4407: 2006. Hydraulic fluid power – Fluid contamination – Determination of particulate contamination by the counting method using an optical microscope.

38. ISO 11500:2008. Hydraulic fluid power – Determination of particulate contamination level of a liquid sample by automatic particle counting using the light-extinction principle.

39. ISO 4406:1999. Hydraulic fluid power – Fluids – Method for coding the level of contamination by solid particles.

40. Target ISO cleanliness codes. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.filterelement.com](http://www.filterelement.com).

41. Энциклопедия Колъера. Судовые энергетические установки и движители [Электронный ресурс]. –[http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_colier/6541/](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_colier/6541/).

42. Комплекс движительный гребной винт – направляющая насадка. Методика расчета и правила проектирования Текст.: ОСТ 5.4129-75. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 202 с.

43. Устюжанина Е. В., Евсюков С. Г., Петров А. Г. и др. Научная школа как структурная единица научной деятельности. – М.: ЦЭМИ РАН, 2011. – 73 с.

44. Антонов А. В. Системный анализ: учебник для вузов / А. В. Антонов. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.

45. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, Н. Н. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1973. – 440 с.

46. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984.

47. Джагупов Р.Г., Плавинский Е.Б., Никольский В.В., Веретенник А.М. Измерительные преобразователи: Учебное пособие. – Одесса: Астропринт, 2002. – 216 с.

48. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – СПб ГУ ИТМО, 2011. – 131 с.

49. Датчики: Справочное пособие / Под общ ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука Москва: Техносфера, 2012. – 624 с.

50. Piezo Motion for Precision Positioning Introduction [Электронный ресурс]. – [http://www.pi-usa.us/tutorial/4\\_24.html](http://www.pi-usa.us/tutorial/4_24.html).

51. SciLab Open source software for numerical computation [Электронный ресурс]. – <http://www.scilab.org/en/scilab/about>.

52. Пьезоэлектрические преобразователи / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ю.Ю. Бондаренко, Т.Ю. Кисиль, М.П. Мусиенко, С.В. Роттэ, И.Б. Чудаева – Черкассы: ЧГТУ, 2004. – 435 с.

53. Патент України № 61323. G01L1/16. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин / Шарапов В.М., Балковська Ю.Ю., Мусієнко М.П. Опуб. 17.11.2003. Бюл. № 11.

54. Шарапов В.М., Балковская Ю.Ю., Симметричный биморфный пьезокерамический преобразователь с линейной амплитудно-частотной характеристикой // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – № 3. С. 43 – 46.

55. Nikolskyi V., Budashko V., Khniunin S. The monitoring system of the Coanda effect for the tension-leg platform's // The 12th International Conference on Engine Room Simulators: Proceeding. – Istanbul Technical University, Istanbul, 19 – 20 November, 2015. – P. 45 – 48.

56. Budashko V.V., Nikolskyi V.V., Onishchenko O.A., Khniunin S.H. Physical modelling effects degradation by interaction azimuthal flow with hull // The 12th International Conference on Engine Room Simulators: Proceeding. – Istanbul Technical University, Istanbul, 19 – 20 November, 2015. – P. 49 – 52.

57. Кера Electronics. Piezoelectric Element. Ceramic self-drive [Электронный ресурс]. – <http://www.chinaacoustic.com/prodList.php?type=0&fid=1&sid=18>.

58. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. – СПб.: Наука, 2007. – 276 с.

59. 8-bit AVR® Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash [Электронный ресурс]. – <http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>.

60. 8-bit AVR® STK500 Communication Protocol [Электронный ресурс]. – <http://www.atmel.com/Images/doc2525.pdf>.

61. Download the Arduino Software [Электронный ресурс]. – <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.

62. Official website Processing [Электронный ресурс]. – <https://www.processing.org>.

63. Flow Watch FW450 [Электронный ресурс]. – <http://www.generaltools.com/flow-watch>.

64. Бойко, А. А. Синтез и исследование системы автоматического симметрирования токов асинхронного двигателя с преобразователем напряжения [Текст] / А.А. Бойко, В. В. Будашко, Е. А. Юшков, Н. А. Бойко // Восточно–европейский журнал передовых технологий. – 2016. Т. 1. № 2 (79). С. 22–34. doi:10.15587/1729–4061.2016.60544.

65. Будашко, В. В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна [Текст] / В. В. Будашко // Електротехніка і Електромеханіка. 2015. №6. – С. 20–25. ISSN 2074–272X. doi:10.20998/2074–272X.2015.6.02/50764.



66. Будашко, В. В. Исследование процессов передачи мощности в комбинированном пропульсивном комплексе при разновекторных нагрузках [Текст] / В. В. Будашко, И. М. Тарасов // Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки // Матеріали науково–методичної конференції, 11.12.2013 – 12.12.2013. – Одеса: ОНМА, 2014, С. 49–52.

67. Будашко, В. В. Концепция моделирования и построения электроэнергетической установки современного судна [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок: зб. наук. праць (колект. монографія). – Одеса: Наука і техніка, 2015. – С. 109–115.

68. Будашко, В. В. Математические основы имитационного моделирования системы управления энергетической установкой бурового судна [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск–камчатский: КамчатГТУ. – 2014. – Вып. 29. – С. 6–13. Режим доступа: \WWW/ URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22822710>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

69. Будашко, В. В. Математическое моделирование всережимных регуляторов оборотов подруливающих устройств судовых энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов [Электронный ресурс] / В. В. Будашко, Е. А. Юшков // Электронное моделирование (Electronic Modeling). – 2015. – V. 37. – №2 (2015). P. 101–114. – Режим доступа: \WWW/ URL: <http://www.emodel.org.ua/index.php/ru/44–archive/2015–год/37–2/594–37–2–8.html> . – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана.

70. Будашко, В. В. Моделирование систем управления мощностью и крутящим моментом подруливающих устройств при позиционировании судов [Текст] / В. В. Будашко, Д. А. Гончаренко // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2014): Материалы международной научной конференции. – Херсон: ХНТУ, 2014. С. 59–61. ISBN 978–966–8912–90–0.

71. Будашко, В. В. Моделирование элементов судовой энергетической установки для исследования режимов работы пропульсивного комплекса [Текст] / В. В. Будашко, І. М. Тарасов // Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства // Матеріали ІІІ Всеукраїнської студентської наукової конференції, м. Херсон, 21 листопада 2013 року). – Херсон: Видавництво ХДМА, 2013, С. 277 – 279.

72. Будашко, В. В. Моделювання електродинамічних процесів в комбінованому пропульсивному комплексі при утриманні позиції [Текст] / В. В. Будашко, Є. О. Юшков // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2012) // Збірка матеріалів четвертої Міжнародної науково–практичної конференції у двох томах, т.2. Херсон: ХДМА, 2012, С.10–12.

73. Будашко, В. В. Моделювання енергетичних процесів у пропульсивному комплексі з асинхронним двигуном на лінії валу [Текст] / В. В. Будашко, Є. О. Юшков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали першої науково–технічної конференції, присвяченої 90–річчю НУК ім. адмірала Макарова. Миколаїв: НУК, 2010, С. 48–51.

74. Будашко, В. В. Моделювання перехідних процесів у дизель–електричному комплексі з малооберттовим дизелем і асинхронним двигуном на лінії валу рушія [Текст] / В. В. Будашко, Є. О. Юшков // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2010). Збірка матеріалів другої Міжнародної науково–практичної конференції у двох томах, т.2. Херсон: ХДМА, 2010, С.77–80

75. Будашко, В. В. Параметризація потужних електричних машин при моделюванні суднових пропульсивних комплексів [Текст] / В. В. Будашко // Наука в інформаційному просторі // Матеріали ІХ Міжнародної науково–практичної конференції у восьми томах ISBN 978–617–645–140–2. – Дніпропетровськ: Біла К.О. – с. 80–83. Режим доступу: \WWW/ URL: [http://www.confcontact.com/2013–nauka–v–informatisionnom–prostranstve/tn9\\_budashko.htm](http://www.confcontact.com/2013–nauka–v–informatisionnom–prostranstve/tn9_budashko.htm). – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

76. Будашко, В. В. Повышение энергетической эффективности холодильных установок средствами автоматизированного управления [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Энергетика судна: експлуатація та ремонт // Матеріали науково–технічної конференції, 26.03.2014 – 28.03.2014. Частина II. – Одеса: ОНМА, 2014, С. 11–13.

77. Будашко, В. В. Приближення експериментальних даних при моделюванні енергетичних установок суднових пропульсивних комплексів [Текст] / В. В. Будашко, І. М. Тарасов // Суднова енергетика: стан та проблеми // Міжнародна науково–технічна конференція. – Миколаїв, НУК: 13.11.2013 – 14.11.2013. Режим доступу: \WWW/ URL: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=49cf5fce4a72d37c93736df1794b?lectureId=25553&conferenceId=19994&isProjectorView=false>.

– 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

78. Будашко, В. В. Применение результатов натуральных испытаний при моделировании энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов [Текст] / В. В. Будашко, Е. А. Юшков // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. The 8th International scientific conference proceedings (July 22, 2015). – Vienna: «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. – 2015. – Р. 89–96. Режим доступа: \WWW/ URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24015711>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

79. Будашко, В. В. Проблеми технічної експлуатації суднової енергетичної установки бурового судна [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Енергетика судна: експлуатація та ремонт // Матеріали науково–технічної конференції, 26.03.2014 – 28.03.2014. Частина II. – Одеса: ОНМА, 2014, С. 9–11.

80. Будашко, В.В. Система імпульсно–фазового управління електроприводом суднової гвинто–кермової установки [Текст] / В. В. Будашко, Є. О. Юшков // Патент UA на корисну модель № 108074, 2016. Режим доступа: \WWW/ URL: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=22486> 3. – 26.06.2016 р. – Загол. З екрану.

81. Будашко, В. В. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 38

(1081). – С. 45–51. Режим доступу: \WWW/ URL: [http://library.kpi.kharkov.ua/Vestnik/2014\\_38.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/Vestnik/2014_38.pdf). – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

82. Будашко, В. В. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко, Е. А. Юшков // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). Технічні науки. – 2014. – №. 2. – С. 88–92. Режим доступу: \WWW/ URL: [http://zbirnyk.vaodessa.org.ua/images/zbirnyk\\_2/13.PDF](http://zbirnyk.vaodessa.org.ua/images/zbirnyk_2/13.PDF). – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана.

83. Вагущенко, Л.Л. Системы автоматического управления движением судна [Текст] // Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. – 3-е изд., перераб. и доп. – Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с. Режим доступу: \WWW/ URL: [http://www.nav-eks.org.ua/CACYDC-na-site/Ychebnik-CACYDC\\_11.pdf](http://www.nav-eks.org.ua/CACYDC-na-site/Ychebnik-CACYDC_11.pdf). – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

84. Глазева, О. В. Аспекти математичного моделювання елементів єдиних електроенергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів [Текст] / О. В. Глазева, В. В. Будашко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 42 (1151). – С. 71–75. Режим доступу: \WWW/ URL:<http://pema.khpi.edu.ua/index.php/2079-3944/article/view/55969>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

85. Дерменжи, В. В. Дослідження дестабілізаційних процесів у дводвигуновому електроприводі вантажно–розвантажувальної системи рефрижераторного судна [Текст] / В. В. Дерменжи, В. В. Будашко // Матеріали науково–методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіоелектроніки», 15.12.2015–16.12.2015, – Одеса: НУ ОМА, 2016, С. 62–66.

86. Одесский крюинг – форум вне политики: Форум [Електронний ресурс]. URL: <http://wap.odessa-crewing.borda.ru/?1-16-0-00000422-000-80-0> (дата звернення: 01.11.2016). 162. Тимченко, В. Л. Робастно–оптимальная стабилизация морских подвижных объектов в режиме динамического позиционирования [Текст] / В. Л. Тимченко, О. А. Ухин // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техника. – 2014. – № 13 (89). – С. 19 – 26.

87. Холодов, Г. Г. Требования национальных морских классификационных обществ к работам на морских шельфах и системам ориентации судов, оснащенных системами динамического позиционирования, и их классификация [Текст] / Г. Г. Холодов. – Вестник МГТУ, том 13, №4/1. – 2010. – С. 712–718. Режим доступа: \WWW/ URL: <http://vestnik.mstu.edu.ru/show.shtml?art=1006>. – 13.10.2016 г. – Загол. з екрану.

88. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [Текст] / Шрейнер Р. Т. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

89. Юдин, Ю. И. Расчет радиальной диаграммы предельных значений скорости ветра для бурового судна «В. Шашин» [Текст] / Ю. И. Юдин, А. Б. Гарбаровский, С. Н. Холичев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. – 2014. – Вып. 1. – С. 7–12. Режим доступа: \WWW/ URL: <http://journal.gumrf.ru/files/2014/1/7-11.pdf>. – 13.10.2016 г. – Загол. з екрану.

90. Будашко, В.В. Оценка эффективности компенсации деградационных эффектов в комбинированном пропульсивном комплексе [Текст] / В. В. Будашко // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 36. – Одесса: ОНМА, 2015. – С. 15–22. ISSN 1815–6770.

91. Иванов В.Н. Решение плоской задачи теории упругости в полиномах. – М.: Российский университет дружбы народов. – 2010. – 30 с.

92. Пат. 100819 Україна, МПК G01L 9/08, 5/12, 1/16. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда / В.В. Будашко, В.В. Нікольський, С.Г. Хнюнін. – № u201501854; заявл. 02.03.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.

93. Пат. 107006 Україна, МПК G01L 9/08, 5/12, 1/16. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда / В.В. Будашко, В.В. Нікольський, С.Г. Хнюнін. – № u201512962; заявл. 28.12.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9.

94. Хнюнин С. Г. Создание системы регистрации возникновения эффекта отклонения потока жидкости / С. Г. Хнюнин // Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. – Серія: “Комп’ютерні технології”. – Вип. 271. – Т. 283. – Миколаїв, 2016.

95. Пьезоэлектрические преобразователи / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ю.Ю. Бондаренко, Т.Ю. Кисиль, М.П. Мусиенко, С.В. Роттэ, И.Б. Чудаева – Черкассы: ЧГТУ, 2004. – 435 с.

96. Мусиенко М.П. Теоретические основы, методы и средства структурно-энергосилового преобразования на основе полиэлектродных пьезокерамических элементов для систем управления: Диссертация д-ра техн. наук: 05.13.05. – Одесса, 2006. – 495 с.

97. Abdin, Z. Solar hydrogen hybrid energy systems for off-grid electricity supply: Review Article [Text] / Z. Abdin, C. J. Webb, E. MacA. Gray // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 52. – P. 1791–1808. doi:10.1016/j.rser.2015.08.011.

98. Abdessameud, A. Motion coordination of thrust-propelled under actuated vehicles with intermittent and delayed communications [Text] // A. Abdessameud, I.G. Polushin, A. Tayebi // Systems & Control Letters. – 2015. – V. 79. – P. 15–22. Doi:10.1016/j.sysconle.2015.02.006.

99. Adamo, F. Estimation of ship emissions in the port of Taranto [Text] / F. Adamo, G. Andria, G. Cavone, C. De Capua, A. M. L. Lanzolla, R. Morello et al. // Measurement. – 2014. – V. 47. – P. 982–988. Doi:10.1016/j.measurement.2013.09.012.



100. Akyuz, E. A marine accident analysing model to evaluate potential operational causes in cargo ships [Text] / E. Akyuz // Safety Science. – 2017. – V. 92. – P. 17 – 25. Doi:10.1016/j.ssci.2016.09.010.

101. Alam, K. Design and construction of an autonomous underwater vehicle [Text] / K. Alam, T. Ray, S. G. Anavatti // Neurocomputing. – 2014. – V. 142. – P. 16 – 29. Doi:10.1016/j.neucom.2013.12.055.

102. Allan, G. The economics of distributed energy generation: a literature review [Text] / G. Allan, I. Eromenko, M. Gilmartin, I. Kockar, P. McGregor // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 42. – P. 543 – 556. Doi:10.1016/j.rser.2014.07.064.

103. Almeter, J. Predicting the impact of design and requirement changes on high performance and conventional craft [Text] / J. Almeter, D. Eberhardt ; Naval Surface Warfare Center // Seventh International Conference On High-Performance Marine Vehicles (HIPER'10) ; Dr. Ing. P. K. Sahoo. – Melbourne, Florida, USA, 2010 (13 – 15 October). – P. 1 – 15. Режим доступа: \WWW/ URL: [http://data.hiper-conf.info/Hiper2010\\_Melbourne.pdf](http://data.hiper-conf.info/Hiper2010_Melbourne.pdf). – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана.

104. Arditti, F. Thrust allocation algorithm with efficiency function dependent on the azimuth angle of the actuators [Text] / F. Arditti, F.L. Souza, T.C. Martins, E.A. Tannuri // Ocean Engineering. – 2015. – V. 105. – P. 206 – 216. Doi:10.1016/j.oceaneng.2015.06.021.

105. Arditti, F. Experimental Analysis of a Thrust Allocation Algorithm for DP Systems Considering the Interference between Thrusters and Thruster-Hull [Text] / F. Arditti, E. A. Tannuri // IFAC Proceedings Volumes. – 2012. – V. 45, I. 27. – P. 43–48. Doi:10.3182/20120919-3-IT-2046.00008.

106. Babadi, M. K. Effect of hull form coefficients on the vessel sea-keeping performance [Text] / M. K. Babadi, H. Ghassemi ; Department of Ocean Engineering, AmirKabir University of Technology // Journal of Marine Science and Technology. – 2013. – 11 p. doi:10.6119/JMST-013-0117-2.

107. Bajec, P. Optimal control of brushless PM motor in parallel hybrid propulsion system [Text] / P. Bajec, B. Pevec, D. Miljavec // Mechatronics. – 2010. – V. 20, I. 4. – P. 464–473. Doi:10.1016/j.mechatronics.2010.04.004.

108. Bal Besikci, E. An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations / E. Bal Besikci, O. Arslan, O. Turan, A. L. Olcer // Computers & Operations Research. – 2016. – V. 66. – P. 393–401. Doi:10.1016/j.cor.2015.04.004.

109. Balcombe, P., Rigby, D., Azapagic, A. Environmental impacts of microgeneration: integrating solar PV, Stirling engine CHP and battery storage / P. Balcombe, D. Rigby, A. Azapagic // Applied Energy. – 2015. – V. 139. – P. 245 – 259. Doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.034.

110. Bekker, J. R. A Packaged System Approach to DP Vessel Conversion [Text] / J. R. Bekker, S. X. Dou // Dynamic positioning conference : Workboats. – 2002 (September 17 – 18). – 22 p. Режим доступа: \WWW/ URL: [http://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2002/workboats\\_packaged\\_system.pdf](http://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2002/workboats_packaged_system.pdf). – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана.

111. Benetazzo, F. Advanced control for fault-tolerant dynamic positioning of an offshore supply vessel [Text] / F. Benetazzo, G. Ippoliti, S. Longhi, P. Raspa // Ocean Engineering. – 2015. – V. 106. – P. 472 – 484. Doi:10.1016/j.oceaneng.2015.07.001.

112. Bentin, M. A New Routing Optimization Tool—influence of Wind and Waves on Fuel Consumption of Ships with and without Wind Assisted Ship Propulsion Systems [Text] / M. Bentin, D. Zastrau, M. Schlaak, D. Freye, R. Elsner, S. Kotzur // *Transportation Research Procedia*. – 2016. – V. 14. – P. 153 – 162. Doi:10.1016/j.trpro.2016.05.051.

113. Bigdeli, N. Optimal management of hybrid PV/fuel cell/battery power system: a comparison of optimal hybrid approaches [Text] / N. Bigdeli // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 42. – P. 377–393. Doi:10.1016/j.rser.2014.10.032.

114. Brezina, A. J. Measurement of Static and Dynamic Performance Characteristics of Electric Propulsion Systems [Text] / A. J. Brezina, S. K. Thomas; American Institute of Aeronautics and Astronautics // 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – Grapevine (Dallas/Ft. Worth Region), Texas, 2013 (07 – 10 January). doi:10.2514/6.2013–500.

115. Bucknall, R. W. G. On the Conceptual Design and Performance of a Matrix Converter for Marine Electric Propulsion [Text] / R. W. G. Bucknall, K. M. Ciaramella // *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010. – V. 25, I. 6. – P. 1497 – 1508. doi:10.1109/TPEL.2009.2037961.

116. Califano, A. Identification of ventilation regimes of a marine propeller by means of dynamic–loads analysis [Text] / A. Califano, S. Steen // *Ocean Engineering*. – 2011. – V. 38, I. 14 – 15. – P. 600 – 1610. Doi:10.1016/j.oceaneng.2011.07.009.

117. Carrera, A. Cognitive system for autonomous underwater intervention [Text] / A. Carrera, N. Palomeras, N. Hurtys, P. Kormushev, M. Carreras // Pattern Recognition Letters. – 2015. – V. 67(1). – P. 91 – 99. Doi:10.1016/j.patrec.2015.06.010.

118. Corradini, M. L. A nonlinear fault-tolerant thruster allocation architecture for underwater remotely operated vehicles [Text] / M. L. Corradini, A. Cristofaro // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – V. 49, I. 23. – P. 285 – 290. Doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.356.

119. Chen, H. Effect of DGPS failures on dynamic positioning of mobile drilling units in the North Sea [Text] / H. Chen, T. Moan, H. Verhoeven // Accident Analysis & Prevention. – 2009. – V. 41, I. 6 – P. 1164 – 1171. Doi:10.1016/j.aap.2008.06.010.

120. Chen, C. Optimal allocation and economic analysis of energy storage system in microgrids [Text] / C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2011. V. 26. – P. 2762 – 2773. Doi:10.1109/TPEL.2011.2116808.

121. Cho, J. Energy storage systems in energy and ancillary markets: a backwards induction approach [Text] / J. Cho, A. N. Kleit // Applied Energy. – 2015. – V. 147. – P. 176 – 183. Doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.114.

122. Choi, C. H. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat / C. H. Choi, S. Yu, I.-S. Han, B.-K. Kho, D.-G. Kang at al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – V. 41, I. 5. – P. 3591 – 3599. Doi:10.1016/j.ijhydene.2015.12.186.

123. Christiaan de Wit. Optimal Thrust Allocation Methods for Dynamic Positioning of Ships / de Wit Christiaan // A thesis submitted to the Delft Institute of Applied Mathematics in partial fulfillment of the requirements. – Delft, the Netherlands: Delft University of Technology. – 2009. – 68 p. Режим доступа: \WWW/ URL: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4c9685ac-3f76-41c0-bae5-a2a96f4d757e>. – 13.10.2016 p. – Загол. з екрану.

124. Cwilewicz, R. Prognosis of marine propulsion plants development in view of new requirements concerning marine fuels [Text] / R. Cwilewicz, Z. Gyrski; Marine Power Plants Department Gdynia Maritime University // Journal of KONES Powertrain and Transport. – Gdynia, 2014. – 2, V. 21. doi:10.5604/12314005.1133866.

125. Dedes, E. K. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping [Text] / E. K. Dedes, D. A. Hudson, S. R. Turnock // Energy Policy. – 2012. – V. 40. – P. 204 – 218. Doi:10.1016/j.enpol.2011.09.046.

126. Dedes, E. K. Investigation of Diesel Hybrid systems for fuel oil reduction in slow speed ocean going ships [Text] / E. K. Dedes, D. A. Hudson, S. R. Turnock // Energy. – 2016. – V. 114. – P. 444 – 456. Doi:10.1016/j.energy.2016.07.121.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение А



### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
 Хнюніна Сергія Георгійовича  
 на тему "Моделі, методи та засоби створення комп'ютерної системи  
 визначення ефекту Коанда на базі п'єзоперетворювачів"  
 у навчальному процесі НУ"ОМА"

Ми, що нижче підписалися, декан факультету автоматики НУ"ОМА", к.т.н., доцент Кар'янський С.А. та завідувач кафедри "Теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки", д.т.н., професор Горб С.І. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Хнюніна С.Г. "Моделі, методи та засоби створення комп'ютерної системи визначення ефекту Коанда на базі п'єзоперетворювачів" впроваджені у навчальному процесі кафедри "Теорія автоматичного управління та обчислювальної техніки", а саме у дисциплінах "Електроніка та мікропроцесорна техніка" (3-й курс факультету автоматики), "Програмування та експлуатація контролерів в системах управління" (3-й курс судномеханічного факультету), "Метрологія та електричні вимірювання" (2-й курс факультету електромеханіки) та "Метрологія, технологічні вимірювання та прилади" (3-й курс факультету автоматики).

Декан факультету автоматики,  
 к.т.н., доцент

Кар'янський С.А.

Завідувач кафедри  
 "Теорії автоматичного управління  
 та обчислювальної техніки",  
 д.т.н., професор

Горб С.І.



## Приложение Б1





## Приложение Б2



УКРАЇНА

(19) UA (11) 100819 (13) U  
 (51) МПК  
 G01L 9/08 (2006.01)  
 G01L 5/12 (2006.01)  
 G01L 1/16 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ  
 УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

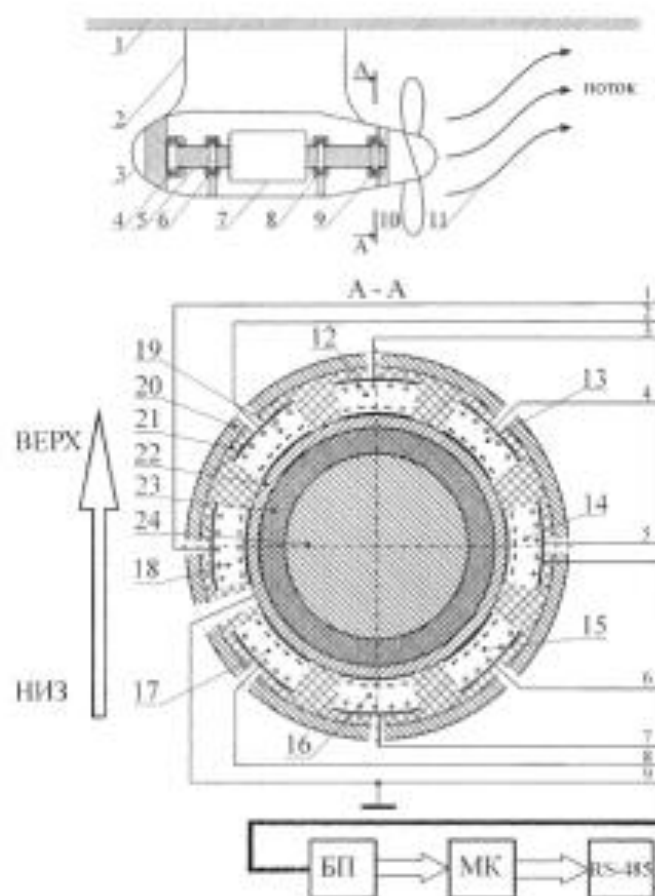
(21) Номер заявки: u 2015 01854	(72) Винахідник(и): Будашко Віталій Віталійович (UA), Нікольський Віталій Валентинович (UA), Хнюнін Сергій Гергійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 02.03.2015	(73) Власник(и): ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029 (UA), Будашко Віталій Віталійович, пр. Полуничний, 31, кв. 19, м. Одеса, 65062 (UA), Нікольський Віталій Валентинович, вул. Гайдара, 76, кв. 12, м. Одеса, 65078 (UA), Хнюнін Сергій Гергійович, вул. Ільфа і Петрова, 13, кв. 9, м. Одеса, 65104 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.08.2015	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.08.2015, Бюл.№ 15	

**(54) СУДНОВА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЕФЕКТУ КОАНДА****(57) Реферат:**

Суднова система моніторингу гвинтокермової установки для попередження ефекту Коанда містить п'єзодатчики, які розташовані подовж окружності дейдвудного підшипника валопроводу гвинтокермової установки, блок перетворювачів та мікроконтролер з видачею інформації по інтерфейсу RS-485.

UA 100819 U

UA 100819 U



Корисна модель належить до систем моніторингу положення гвинтокермової установки (ГКУ) для попередження ефекту Коанда, що встановлюється на великі яхти і пасажирські судна, судна змішаного (ріка-море) плавання, буксири, рятувальні судна, плаваючі бурові платформи та науково-дослідні судна, кригопаміні та військові кораблі прибережної зони [1-4].

5 Відома система на даний час складається з механічної протидії ефекту Коанда за рахунок нахилу балера всієї конструкції ще на етапі конструювання гвинтокермової установки для надання напрямку потоку води під кутом від днища судна [5].

Недоліки системи проявляються в зниженні загального коефіцієнта корисної дії конструкції за рахунок направлення потоку води не паралельно днищу судна. Іншим недоліком системи є те, що при роботі гвинто-кермової установки в реверсному режимі потік води вже направлений до днища судна, що викликає сприятливі умови для виникнення ефекту Коанда і в свою чергу призводить до втрати керованості судна.

10 Найбільш близьким за технічною суттю та результатом, що досягається, до винаходу, що пропонується, є спосіб укладання гвинта в трубу з пелюстковими відбивачами або направляючу насадку [6]. У цьому випадку потік води постійно спрямований у бік, компенсуючи можливе виникнення ефекту Коанда.

Недоліки системи, які обумовлені використанням направляючої насадки [7,8]:

корпус насадки в тому місці, де лопаті гвинта найбільш підходять близько, піддається сильній корозії;

20 при маневруванні з-за нахилу потоку спостерігається сильна вібрація ГКУ;

при обростанні насадки шаром морських рослин і тварин ефективність ГКУ судна помітно падає;

загальна конструкція гвинта з насадкою складніше у конструюванні і дорожче у виготовленні;

25 постійне збільшене тертя потоку води скрізь направляючу насадку навіть у той час, коли ефект Коанда не проявляється;

при роботі в реверсному режимі струмінь води вже направлена до днища судна посилюючи ефект Коанда.

Задачею корисної моделі є створення системи моніторингу виникнення ефекту Коанда для подальшої мінімізації підвищеного зносу дейдвудного, упорного і опорних підшипників гвинтокермової установки.

30 Поставлена задача вирішується тим, що суднова система моніторингу гвинтокермової установки для попередження ефекту Коанда, яка відрізняється тим, що містить п'єзодатчики, які розташовані подовж окружності дейдвудного підшипника валопроводу гвинтокермової установки, блок перетворювачів та мікроконтролер з видачею інформації по інтерфейсу RS-485.

Технічний ефект досягається завдяки тому, що ефект Коанда полягає в тому, що струмінь води, що проходить через гвинт судна, прагне відхилитися у напрямку до днища і при певних умовах "прилипає" до неї. В процесі цього відхилення на гвинт з валопроводом починає діяти сила в напрямку дії ефекту. В результаті, по-перше, валопровід в свою чергу впливає на дейдвудний, упорний та опорні підшипники, що призводить до нерівномірного зносу останніх. По-друге, внаслідок прояву ефекту Коанда виникають труднощі з утриманням позиції судна. У зв'язку з конструктивною особливістю знаходження всієї ГКУ нижче ватерлінії під днищем судна ускладнений підхід до діагностики, планового обслуговування і ремонту.

45 На кресленні зображено ГКУ, яка змонтована на судні і напрям потоку при виникненні ефекту Коанда.

Система містить: 1 - днище судна; 2 - балл ер; 3 - силова гондола; 4 - упорний підшипник; 5 - валопровід; 6 та 8 - опорні підшипники; 7 - механічний або електричний пристрій; 9 - дейдвудний підшипник; 10 - гвинт; 11 - напрям потоку води.

50 При виникненні ефекту Коанда гвинт 10 з валопроводом 5 під дією потоку води 11 зміщується вгору до днища 1, що призводить до нерівномірного зносу дейдвудного 9, упорного 4 та опорних підшипників 6, 8.

У розрізі за А - А зображено принципова схема підключення системи моніторингу.

Схема підключення містить: 12-19 - п'єзодатчики; 20 - корпус судна; 21 - діелектричний шар; 22 - негативний полюс; 23 - дейдвудний підшипник; 24 - валопровід; ЕП - блок перетворювачів; МК - мікроконтролер; RS-485 - інтерфейс промислового Ethernet.

55 Робота складається з двох етапів:

у стані спокою при відсутності ефекту Коанда сумарна напруга на електродах п'єзодатчиків 12-19 дорівнює нулю;

60 в робочому стані при виникненні ефекту Коанда сумарна напруга на електродах п'єзодатчиків не дорівнює нулю. У цьому стані при виникненні ефекту Коанда валопровід 24



## UA 100819 U

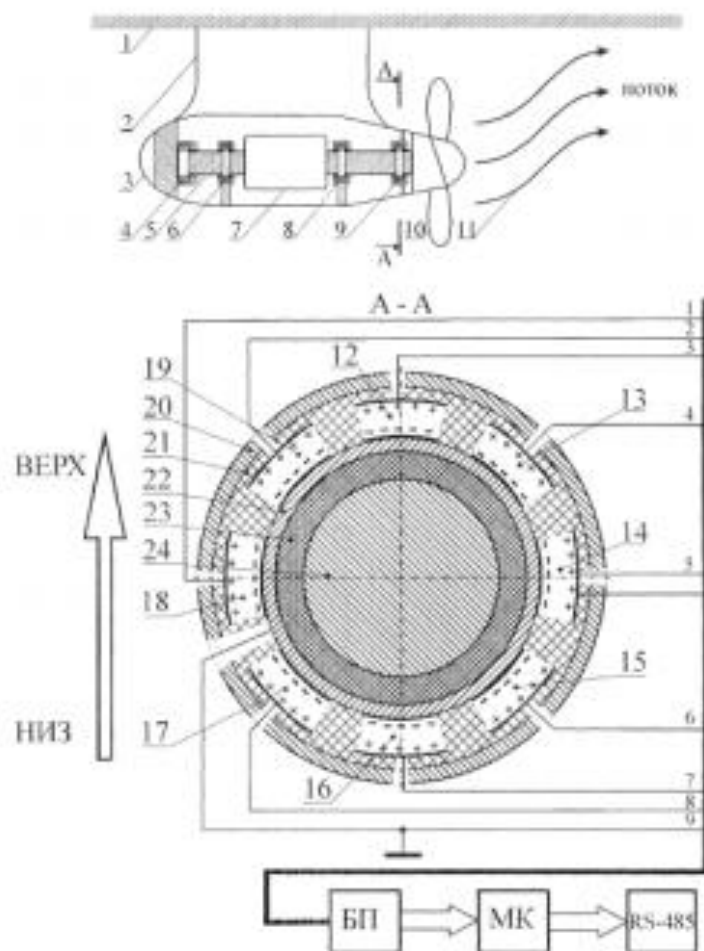
змщується вгору і тисне на дейдвудний підшипник 23, який деформує п'єзодатчик 12. П'єзодатчик перетворює механічну деформацію в електричний сигнал, який подається по шині даних через блок перетворювачів БП на мікроконтролер МК і далі в промислову мережу Ethernet.

- 5        Елементи винаходу можуть бути реалізовані згідно з відомими схемами:  
       п'єзодатчики 12-19 (креслення) фірми Керо Electronics типу MFT [9] або вібрації LDT0-028K [10];  
       блок перетворювачів (БП) - вимірювальні перетворювачі сигналів напруги від Phoenix Contact (креслення) MCR-VAC-UI-O-DC-2811103 [11];  
 10        мікроконтролер (МК) від Phoenix Contact (креслення) ILC 1xx-3xx серій [12];  
       інтерфейс RS-485 - функціональні модулі клемні Inline від Phoenix Contact (креслення) IB IL RS 485/422-2MBD-PAC-2862097 [13].
- Джерела інформації:
1. Contra-rotating Azipod propulsion selected for Japanese fast ferries // The Naval Architect, June 2003, p. 6.  
 15        2. Highly manoeuvrable CRP Azipod solution for big boxships // MER, Oct. 2001, pp. 43-44.  
       3. Kurimo R., Poustoshniy A. V., Syrkin E. N. Azipod propulsion for passenger cruisers // NAV & HSMV International Conference, Sorrento, 18-21 March 1997.  
       4. IB Rothelein, river icebreaker with Azipod propulsion for Osterreichische Donaukraftwerke AG  
 20        // Ship & Boat, June 1995.  
       5. Представление движителей Azipod серии VI [Електронний ресурс]. - [http://www.05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/908eb000f6546300c1aa/\\$file/azipod\\_vi\\_project\\_guide\\_ru.pdf](http://www.05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/908eb000f6546300c1aa/$file/azipod_vi_project_guide_ru.pdf). 2577e5004191  
       6. Комплекс движительный гребной винт - направляющая насадка. Методика расчета и правила проектирования Текст.: ОСТ 5.4129-75. - М.: Изд-во стандартов, 1975.-202 с.  
 25        7. Судоремонт от А до Я. Направляющие насадки [Електронний ресурс]. - <http://sudoremont.blogspot.com/2014/07/napravlyayushie-nasadki.html>.  
       8. Антоненко С.В. Судовые движители: учебное пособие. -Владивосток: ДВГТУ, 2007.-126 с.  
       9. Керо Electronics. Piezoelectric Element. Ceramic self-drive [Електронний ресурс]. - <http://www.chinaacoustic.com/prodList.php?type=0&fid=1&sid=18>.  
 30        10. Measurement Specialties. Piezo Film Product Guide [Електронний ресурс]. - [http://meas-spec.com/downloads/Piezo\\_Film\\_Product\\_Guide.pdf](http://meas-spec.com/downloads/Piezo_Film_Product_Guide.pdf).  
       11. Список продукції Phoenix Contact: перетворювачі напруги змінного і постійного струму [Електронний ресурс]. - <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ua?url=pxc-oc-itemdetail;pid=2811103&library=uaauk&tab=1>.  
 35        12. Краткий каталог продукции Phoenix Contact 2014. Контроллеры. - С. 165 [Електронний ресурс]. [https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads\\_ed/local\\_ru/web\\_dwt\\_promotion/KrakivCatalog2014.pdf](https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/local_ru/web_dwt_promotion/KrakivCatalog2014.pdf).  
       13. Список продукції Phoenix Contact: компоненти для систем введення/виведення  
 40        [Електронний ресурс]. - <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ua?url=pxc-oc-itemdetail;pid=2862097&library=uaauk&tab=1>.

## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 45        Суднова система моніторингу гвинтокермової установки для попередження ефекту Коанда, яка відрізняється тим, що містить п'єзодатчики, які розташовані подовж окружності дейдвудного підшипника валопроводу гвинтокермової установки, блок перетворювачів та мікроконтролер з видачею інформації по інтерфейсу RS-485.

UA 100819 U



Комп'ютерна верстка І. Мироненко

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



## Приложение В1



## Приложение В2



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **107006** (13) **U**

(51) МПК

**G01L 1/16** (2006.01)**G01L 5/12** (2006.01)**G01L 9/08** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2015 12962</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>28.12.2015</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.05.2016</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.05.2016, Бюл.№ 9</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Хнюїн Сергій Георгійович (UA), Нікольський Віталій Валентинович (UA), Будашко Віталій Віталійович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029 (UA), Хнюїн Сергій Георгійович, вул. Ільфа і Петрова, 13, кв. 9, м. Одеса, 65104 (UA), Нікольський Віталій Валентинович, вул. Гайдара, 76, кв. 12, м. Одеса, 65078 (UA), Будашко Віталій Віталійович, пр. Полуничний, 31, кв. 19, м. Одеса, 65062 (UA)</b></p>
---	--

**(54) СУДНОВА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЕФЕКТУ КОАНДА****(57) Реферат:**

Суднова система моніторингу стану гвинто-кормової установки для попередження ефекту Коанда. Додатково система містить п'єзодатчики, які розташовані у місці кріплення гвинто-кормової установки до корпусу судна, блок перетворювачів та мікроконтролер з видачею інформації по інтерфейсу RS-485.

UA 107006 U



UA 107006 U

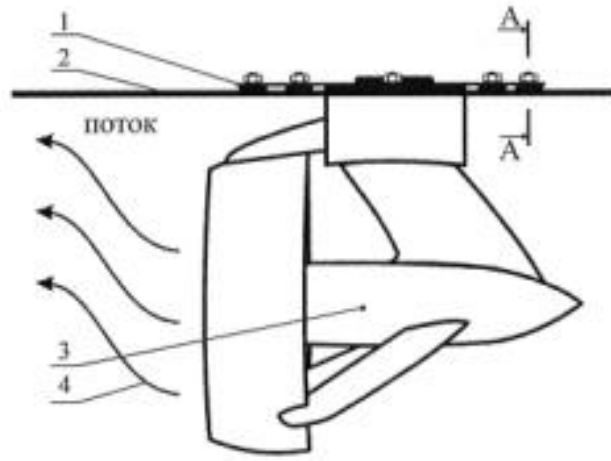


Fig. 1



Корисна модель належить до систем моніторингу положення гвинто-кормової установки (ГКУ) для попередження ефекту Коанда, що встановлюється на великі яхти і пасажирські судна, судна змішаного (ріка-море) плавання, буксири, рятувальні судна, плаваючі бурові платформи та науково-дослідні судна, криголами та військовій кораблі прибережної зони [1-4].

Відома система на даний час складається з механічної протидії ефекту Коанда за рахунок нахилу балера всієї конструкції ще на етапі конструювання ГКУ для придання напрямку потоку води під кутом від днища судна [5].

Недоліки системи проявляються в наступному:

- ускладнення конструкції ГКУ;
- зниження загального коефіцієнта корисної дії конструкції за рахунок направлення потоку води не паралельно днищу судна;

- напрям потоку води під кутом у бік від днища судна не позбавляє повністю від виникнення ефекту Коанда, а лише відсуває момент його виникнення на більш високій швидкості;

- що при роботі ГКУ в реверсному режимі потік води вже направлений до днища судна, що викликає сприятливі умови для виникнення ефекту Коанда і, в свою чергу, призводить до втрати керованості судна;

- потрібно проводити перерахунок нахилу балера ще на етапі конструювання і немає можливості внести зміни до вже працюючої ГКУ під інші умови роботи.

Найбільш близьким за технічною суттю та результатом, що досягається, до корисної моделі, що пропонується, є "Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда" [6], що містить п'єзодатчик, які розташовані подовж окружності дейдвудного підшипника валопроводу ГКУ.

Недоліки системи, які обумовлені використанням "Суднової системи моніторингу для попередження ефекту Коанда", полягають у складності інтеграції п'єзоелектричних датчиків для реєстрації відхилення валопроводу в дейдвудний підшипник ГКУ, яку слід проводити ще на етапі конструювання та будівництва.

Задачею корисної моделі є створення системи моніторингу виникнення ефекту Коанда для подальшої мінімізації підвищеного зносу дейдвудного, упорного та опорних підшипників ГКУ.

Поставлена задача вирішується тим, що суднова система моніторингу стану гвинто-кормової установки для попередження ефекту Коанда, згідно з корисною моделлю, додатково містить п'єзодатчик, які розташовані у місці кріплення гвинто-кормової установки до корпусу судна, блок перетворення та мікроконтролер з видачею інформації по інтерфейсу RS-485.

Технічний ефект досягається завдяки тому, що ефект Коанда полягає в тому, що струмінь води, що проходить через гвинт судна, прагне відхилитися у напрямку до днища і при певних умовах "прилипає" до нього. В процесі цього відхилення на гвинт з валопроводом починає діяти сила в напрямку дії ефекту. В результаті, по-перше, валопровід, в свою чергу, впливає на дейдвудний, упорний та опорні підшипники, що призводить до нерівномірного зносу останніх. По-друге, наслідок прояву ефекту Коанда виникають труднощі з утриманням позиції судна. У зв'язку з конструктивною особливістю знаходження всієї ГКУ нижче ватерлінії під днищем судна ускладнюється підхід до діагностики, планового обслуговування і ремонту. Отримані дані [7-10] дозволяють розмістити п'єзодатчик в точках найбільшого напруження для подальшої реєстрації виникнення ефекту Коанда.

На фіг. 1 зображено ГКУ, вид збоку; на фіг. 2 - ГКУ, вид зверху, яка змонтована на судні, і напрям потоку води при виникненні ефекту Коанда.

Система містить: 1 - місце кріплення колонки ГКУ; 2 - корпус судна; 3 - колонка ГКУ; 4 - напрям потоку води.

При виникненні ефекту Коанда колонка ГКУ 3 під дією потоку води 4 впливається вгору до корпусу судна 2, що викликає деформацію вузлів ГКУ у наслідок чого з'являється нерівномірний знос дейдвудного, упорного та опорних підшипників ГКУ.

На фіг. 3 у розрізі за А-А зображений один з п'єзодатчиків, змонтованих в місці кріплення ГКУ до корпусу судна.

Система містить: 1 - кріплення колонки ГКУ; 2 - корпус судна; 5 - болт, яким з'єднує ГКУ до корпусу судна; 6 - гайка; 7 - шайба; 8, 10 - прокладки з ізолюючого матеріалу; 9 - п'єзодатчик; 11, 12 - позитивний і негативний контакти п'єзодатчика; БП - блок перетворення; МК - мікроконтролер; RS-485 - інтерфейс промислового Ethernet.

Робота складається з двох етапів:

- у стані спокою при відсутності ефекту Коанда напруження на всіх п'єзодатчиках однакова і дорівнює нулю;

- в робочому стані при виникненні ефекту Коанда колонка ГКУ у місці кріплення 1 відчуває поперечні коливання і починає впливати на болт 5, яким стягує колонку ГКУ з корпусом судна 2.

## UA 107008 U

Під дією цієї сили п'єзодатчик 9, який знаходиться між ними, деформується, перетворює механічну деформацію в електричний сигнал на контактах 11 і 12. Прокладки 8 і 10 з ізоляційного матеріалу служать також демпфуючим шаром, який оберігає від руйнування п'єзодатчик. Отриманий електричний сигнал подається по шині даної через блок

перетворення БП на мікроконтролер МК і далі в промислову мережу Ethernet.

Елементи корисної моделі можуть бути реалізовані згідно з відомими схемами:

- п'єзорезистивні датчики (PRS) компанії Physik Instrumente [11] або п'єзодатчики компанії "Аврора-ЕЛМА" з п'єзокерамічних матеріалів на основі цирконату-титанату свинцю (система ЦТС) [12];

- блок перетворення (БП) - вимірковальні перетворені сигнали напруги від Phoenix Contact MCR-VAC-UI-O-DC-2811103 [13];

- мікроконтролер (МК) від Phoenix Contact ILC 1xx-3xx серії [14];

- інтерфейс RS-485 - функціональні модулі елементи Inline від Phoenix Contact IB IL RS 485/422-2MBD-PAC-2862097 [15].

Джерела інформації:

1. Contra-rotating Azipod propulsion selected for Japanese fast ferries // *The Naval Architect*, June 2003, p. 6.

2. Highly manoeuvrable CRP Azipod solution for big boxships // *MER*, Oct. 2001, pp. 43-44.

3. Kurimo R., Poustoshniy A. V., Sytkin E. N. Azipod propulsion for passenger cruisers // *NAV & HSMV International Conference*, Sorento, 18-21 March 1997.

4. IB Rothstein, river icebreaker with Azipod propulsion for Ostereichische Donaukraftwerke AG // *Ship & Boat*, June 1995.

5. Представление датчиков Azipod серии VI [Електронний ресурс]. - [http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/908eb00018546300c12577e5004191aa5file/azipod\\_wjproject\\_guide\\_ru.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/908eb00018546300c12577e5004191aa5file/azipod_wjproject_guide_ru.pdf).

6. Пат. 100819 Україна, МПК G01L 9/08, 5/12, 1/16. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда / В.В. Будашко, В.В. Никольський, С.Г. Хнюнин. - № u201501854; заявл. 02.03.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.

7. Никольський В.В., Будашко В.В., Хнюнин С.Г., Раєнко Н.Е. Система моніторингу позиціонування популгрозних плавучих бурових установок // *Судові енергетичні системи: наук. -техн. сб.* - 2015. - № 35. - Одеса: ОНМА. - С. 137-141.

8. Будашко В.В., Никольський В.В., Хнюнин С.Г., Накуп Ю.А. Система моніторингу стану винторулової колонки для попередження ефекту Коанда // *Автоматизація судових технічних засобів: наук. -техн. сб.* - 2015. - Вып. 21. - Одеса: ОНМА. - С. 22-28.

9. Nikolskiy V., Budashko V., Khniunin S. The monitoring system of the Coanda effect for the tension-leg platform's // *The 12th International Conference on Engine Room Simulators: Proceeding.* - Istanbul Technical University, Istanbul, 19-20 November, 2015. - P. 45-48.

10. Budashko V.V., Nikolskiy V.V., Onishchenko O.A., Khniunin S.H. Physical modelling effects degradation by interaction azimuthal flow with hull // *The 12th International Conference on Engine Room Simulators: Proceeding.* -Istanbul Technical University, Istanbul, 19-20 November, 2015. - P. 49-52.

11. Physik Instruments. The Right Position Sensor Technology. Nanometer-Precision measurement Technology [Електронний ресурс]. [http://www.physikinstrumente.com/download/TEC05\\_Datasheet\\_J11025.pdf](http://www.physikinstrumente.com/download/TEC05_Datasheet_J11025.pdf).

12. Компания "Аврора-ЭЛМА". Каталог типоразмеров пьезоэлементов [Електронний ресурс]. - [http://www.avrora-elma.ru/data/piezo\\_catalog.pdf](http://www.avrora-elma.ru/data/piezo_catalog.pdf).

13. Список продукції Phoenix Contact: перетворені напруги змінного і постійного струму [Електронний ресурс]. - <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ua?url=pxc-oc-itemdetail?id=2811103&library=uauk&tab=1>.

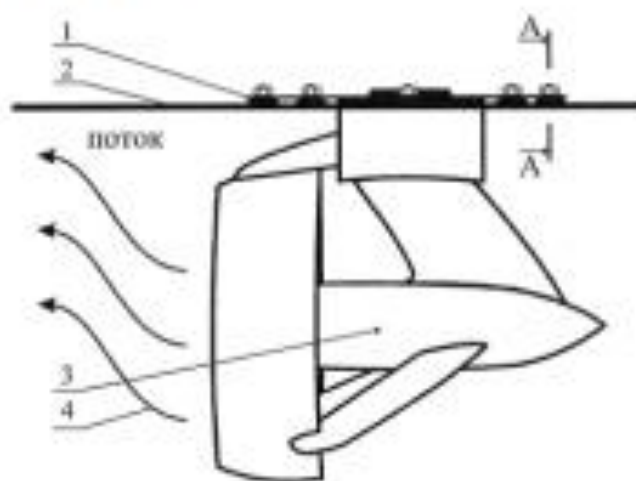
14. Краткий каталог продукции Phoenix Contact 2014. Контроллеры. - С. 165 [Електронний ресурс]. [https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads\\_ed/local\\_ru/web\\_dwl\\_promotion/KrakyCatalog2014.pdf](https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/local_ru/web_dwl_promotion/KrakyCatalog2014.pdf).

15. Список продукції Phoenix Contact: компоненти для систем введення/виведення [Електронний ресурс]. - <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ua?url=pxc-oc-itemdetail?id=2862097&library=uauk&tab=1>.

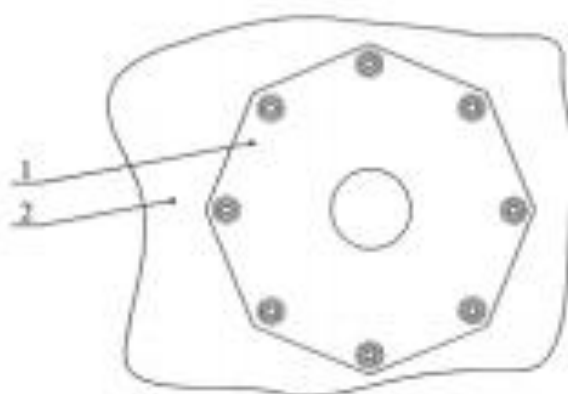
## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Суднова система моніторингу стану гвинто-кормової установки для попередження ефекту Коанда, яка відрізняється тим, що містить п'єзодатчики, які розташовані у місці кріплення

гвинто-кормової установки до корпусу судна, блок перетворення та мікроконтролер з віддачею інформації по інтерфейсу RS-485.

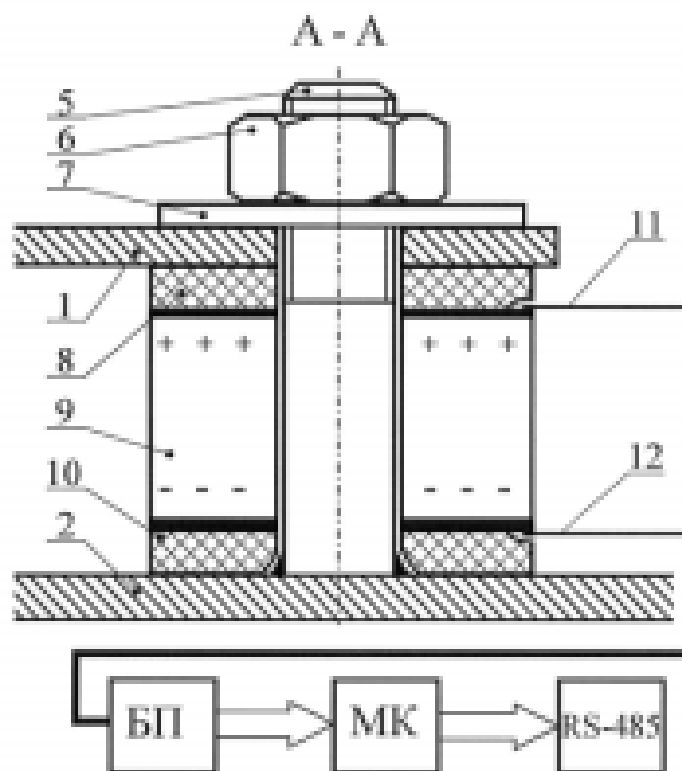


Фиг. 1



Фиг. 2

UA 107006 U



Фиг. 3

---

Комп'ютерна версія Г. Пивельова

---

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

---

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601