

---

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-66-72  
УДК 629.5.018.1  
EDN: UIZSIY

В.П. Скородумов  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ НАСАДОЧНОГО ДИНАМОМЕТРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ГЛУБОКОВОДНОМ ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДВИЖИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Объектом исследования являются динамометры. Цель – разработать динамометр для исследования характеристик перспективных движительных комплексов. В данной работе проведен анализ базы существующих динамометров отечественной и зарубежной разработки, а также анализ их использования в качестве измерительного оборудования для измерения характеристик перспективных движительных комплексов, выявлены недостатки конструкций. Разработан и изготовлен насадочный динамометр, выявлены особенности конструкции и произведены ее усовершенствования с заданными требованиями.

**Ключевые слова:** динамометр, гидродинамика, частотные, изготовление, проектирование, пропульсивные.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-66-72  
УДК 629.5.018.1  
EDN: UIZSIY

V.P. Skorodumov  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## DEVELOPMENT OF DUCT DYNAMOMETER FOR MODEL TESTS OF ADVANCED PROPELLER SYSTEMS IN DEEP-WATER TANK

The object of research is dynamometric equipment. The purpose is to develop a dynamometer for studies on advanced propeller systems. The data base of existing foreign and home-made dynamometers is reviewed, and their application for measuring characteristics of advanced propeller systems is analyzed. Some drawbacks in their construction are identified. A duct dynamometer is developed and manufactured. Specific features of its construction are identified, and it is improved to suit given requirements.

**Ключевые слова:** dynamometer, hydrodynamics, frequency, manufacture, design, propulsion.

*The author declares no conflicts of interest.*

### Введение

#### Introduction

В последние годы как в РФ, так и за рубежом получили достаточно широкое распространение в подводном судостроении водометные движители типа

pump-jet. Движители насосного типа (pump-jet) представляют собой рабочее колесо (РК), находящееся в профилированной направляющей насадке (НН), выбранная форма которой позволяет управлять потоком воды внутри водовода, замедлять или ускорять его.

---

*Для цитирования:* Скородумов В.П. Разработка конструкции насадочного динамометра для проведения модельных испытаний в глубоководном опытном бассейне перспективных движительных комплексов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; Специальный выпуск 1: 66–72.

*For citations:* Skorodumov V.P. Development of duct dynamometer for model tests of advanced propeller systems in deep-water tank. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; Special Issue 1: 66–72 (in Russian).

Существуют две разновидности таких движителей. В одном случае перед рабочим колесом в носовой части насадки устанавливается неподвижный направляющий аппарат (НА), выполняющий одновременно функции крепления насадки к корпусу подводного объекта (ПО). Во втором случае за рабочим колесом в кормовой части насадки располагается неподвижный спрямляющий аппарат (СА), а сама насадка крепится к корпусу ПО с помощью державок, имеющих симметричный относительно набегающего потока профиль, либо непосредственно к кормовому оперению.

Совершенствование движительных комплексов сложной конфигурации невозможно без проведения ряда ответственных модельных экспериментов. Улучшение же качества модельного эксперимента в свою очередь требует как дальнейшей проработки теоретического, научного обоснования исследований, так и развития экспериментальной базы, аппаратного и методического ее насыщения.

Поэтому целью данного исследования являлось спроектировать и изготовить новый вид динамометра для исследования сил, создаваемых на направляющем аппарате водометного движителя. Для достижения поставленной цели было спроектировано и изготовлено новое динамометрическое оборудование и проведена метрологическая аттестация.

Исследуемый тип движителя состоит из трех основных элементов, таких как вращающийся гребной винт, профилированная кольцевая направляющая насадка, неподвижная лопастная система перед гребным винтом (направляющий аппарат), выполняющая роль крепежных кронштейнов насадки и устройства формирования закручивания потока перед гребным винтом для увеличения его эффективности. При проектировании подобных движителей для достижения наилучших гидродинамических, кавитационных и акустических характеристик необходимо учитывать взаимное влияние каждого элемента друг на друга. Такую сложную проектировочную схему невозможно создать без качественной экспериментальной проверки сил и моментов на каждом элементе. Определение осевой составляющей силы на насадке и направляющем аппарате позволяет в дальнейшем вести работы по уменьшению их сопротивления. Определение момента направляющего аппарата позволяет оценить степень его согласованности с гребным винтом. Получаемые результаты позволяют ввести необходимые кор-

ректировки в проектировочную схему движительного комплекса.

## Описание проблемы

### Problem description

При проведении самоходных испытаний модели ПО, оснащенной движителем pump-jet, необходимо измерять силу и момент, реализуемые на направляющем аппарате и насадке (в дальнейшем под направляющим аппаратом (НА) будем подразумевать направляющий аппарат с насадкой). Сейчас для решения этой задачи используется насадочный динамометр типа ДН-3. Указанный динамометр был разработан в 1979 г. и предназначен для измерения продольной силы, реализуемой на насадке гребного винта, без направляющего аппарата (рис. 1, см. вклейку).

Насадка крепилась к динамометру при помощи кронштейнов, которые соответствовали кронштейнам натурального корабля.

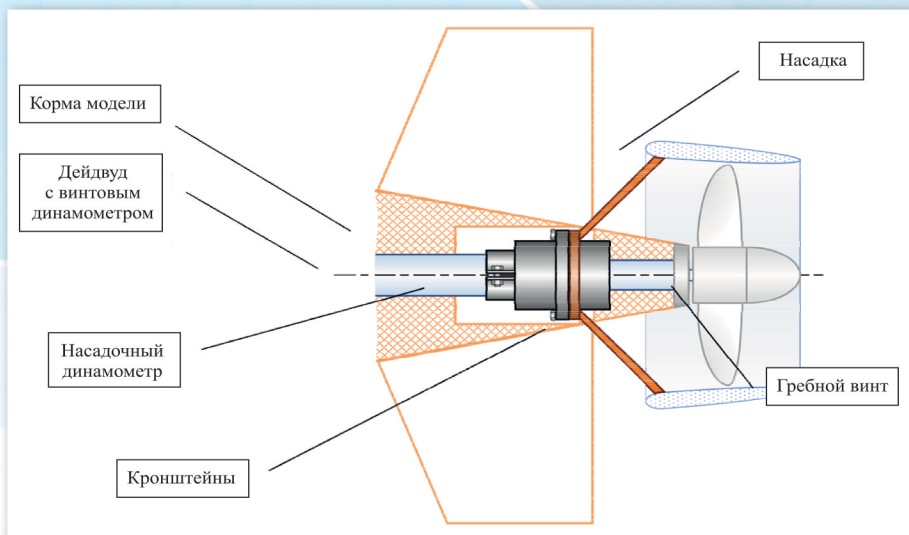
Направляющий аппарат крепится к корпусу ПО ступицей. При применении во время модельных испытаний динамометров типа ДН-3 приходится изготавливать кронштейн сложной формы и размещать его внутри обводов кормовой части модели (рис. 2, см. вклейку).

Недостатки такой схемы:

- Измеряется только продольная сила, реализуемая на НА. Этого было достаточно для обычной насадки (момент на ней пренебрежимо мал). Для исследования НА необходимо измерять продольную силу и момент.
- Массивный НА подвешен на достаточно длинной консоли, что вызывает перекося силовой измерительной пружины и является источником погрешности измерения.
- Значительный крутящий момент, возникающий на НА, в свою очередь вызывает деформации силовой измерительной пружины.
- Сборка из насадочного динамометра и кронштейна имеет значительные габариты, что не всегда позволяет вписать ее в кормовую часть модели.

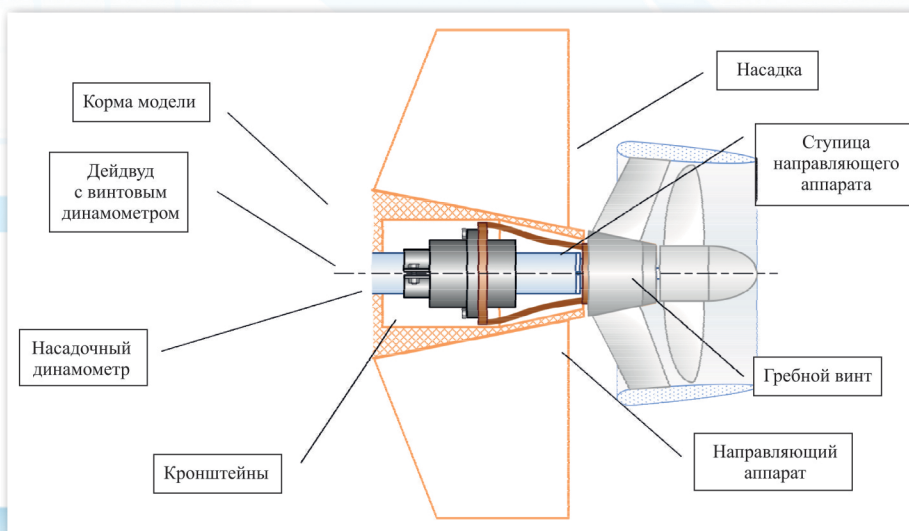
Был спроектирован и изготовлен специализированный насадочный динамометр, предназначенный для испытаний НА. Указанный динамометр должен:

- измерять упор и момент, реализуемые на НА;
- размещаться внутри ступицы НА;
- быть рассчитан на весовую нагрузку типичного НА;



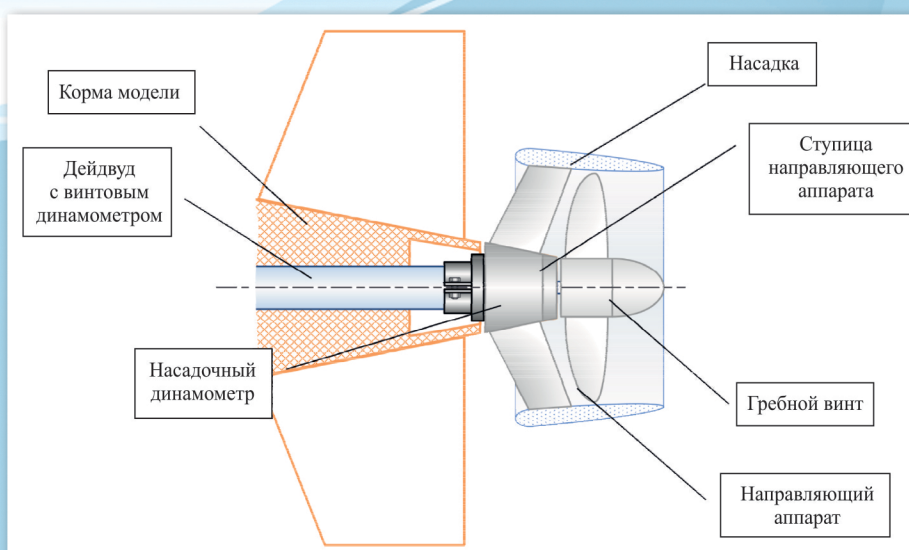
**Рис. 1.** Схема монтажа насадочного динамометра ДН-3 на самоходной модели, оснащенной гребным винтом в насадке без направляющего аппарата

**Fig. 1.** Mounting setup of the DN-3 duct dynamometer on a self-propelled model equipped with ducted propeller (without guide vane unit)



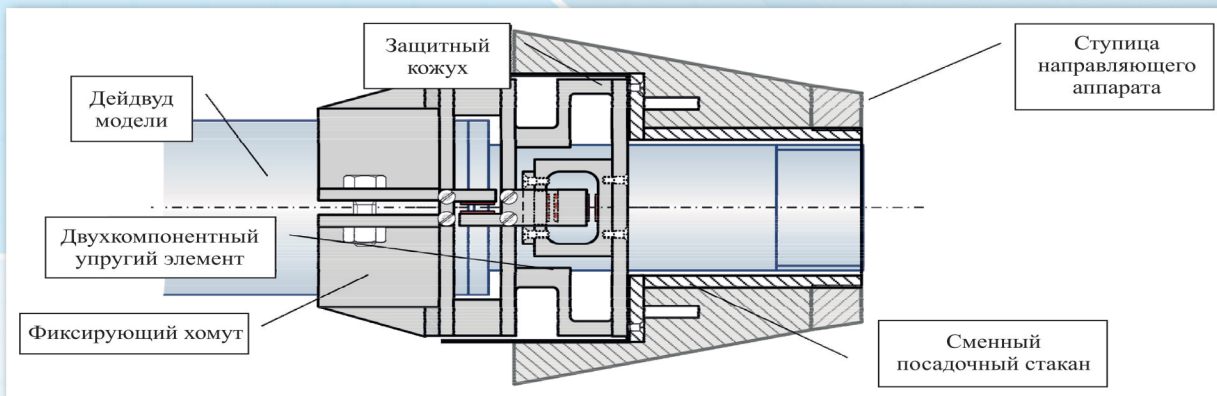
**Рис. 2.** Схема монтажа насадочного динамометра ДН-3 на самоходной модели подводной лодки, оснащенной гребным винтом в насадке с направляющим аппаратом

**Fig. 2.** Mounting setup of the DN-3 duct dynamometer on a self-propelled submarine model equipped with ducted guide-vane propeller



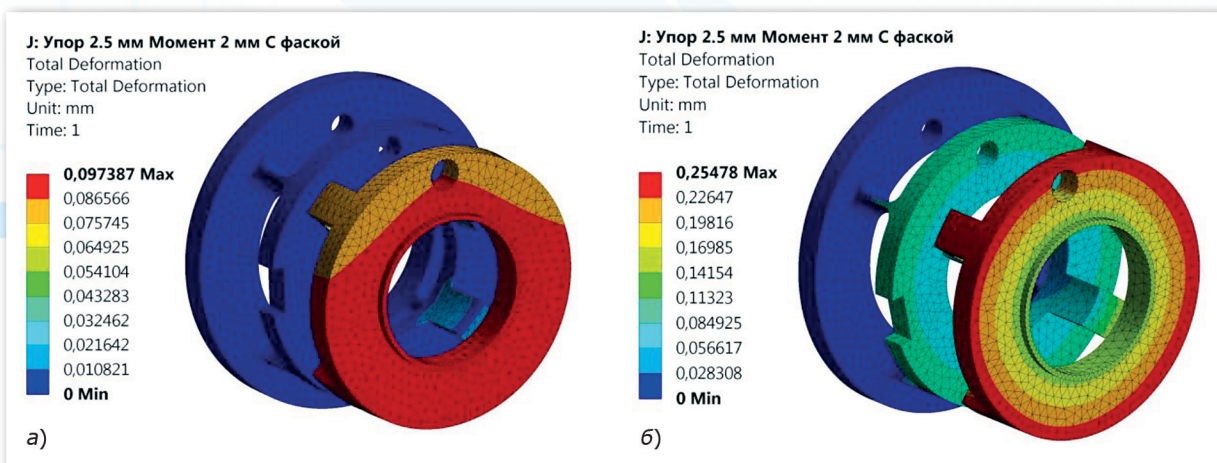
**Рис. 3.** Схема монтажа проектируемого насадочного динамометра на самоходной модели подводной лодки, оснащенной гребным винтом в насадке с направляющим аппаратом

**Fig. 3.** Mounting setup of the duct dynamometer under design on a self-propelled submarine model equipped with ducted guide-vane propeller



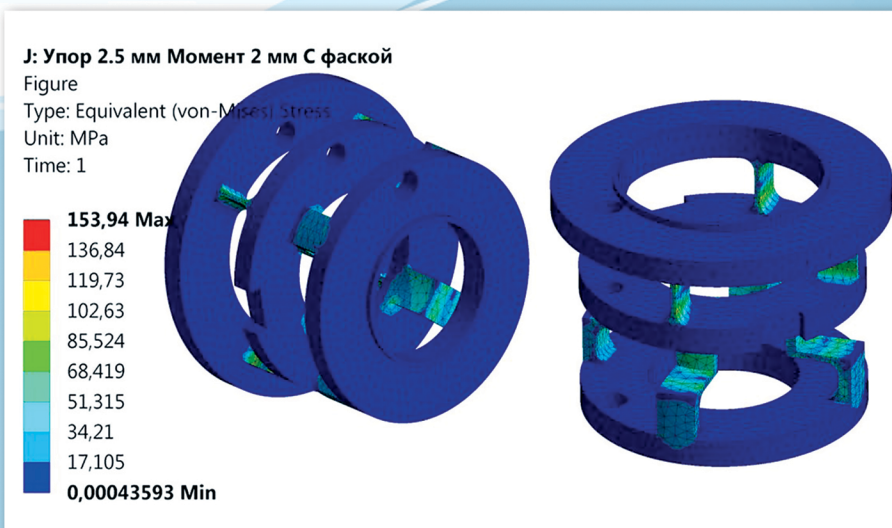
**Рис. 4.** Кинематическая схема двухкомпонентного насадочного динамометра. Динамометр размещен на дейдвуде модели. Показана ступица направляющего аппарата

**Fig. 4.** Kinematic scheme of a two-component duct dynamometer. Kinematic scheme of a two-component duct dynamometer. Dynamometer is fitted in model's stern tube. The hub of guide vane unit is shown



**Рис. 9.** Деформированное состояние (в суммарных перемещениях) пружинного элемента при действии заданного силового воздействия: а) первый шаг нагружения; б) второй шаг нагружения

**Fig. 9.** Deformation of the spring element (in total displacements) under given force: a) first loading step; б) second loading step



**Рис. 10.** Распределение нормальных напряжений  $\sigma_{eqv}$  возникающих в пружинном элементе при заданном силовом воздействии

**Fig. 10.** Distribution of normal stresses  $\sigma_{eqv}$  in spring element under given force

- допускать погружение в пресную воду на глубину до 2 м.

Схема применения проектируемого насадочного динамометра приведена на рис. 3, см. вклейку.

В качестве силоизмерительного элемента использовались катушки индуктивности, выходным сигналом являлся частотный сигнал. Кинематическая схема двухкомпонентного насадочного динамометра приводится на рис. 4, см. вклейку.

По имеющимся данным готовых динамометров подобного типа нет. Разработанное изделие является уникальным как минимум в России.

Разработанная конструкция насадочного динамометра позволит устранить данный недостаток, исключив баллер из схемы измерений, а также измерить крутящий момент на насадке, который ранее не измерялся. Конструкция разработанного динамометра достаточно универсальна и предназначена для крепления насадок различного вида и размера.

При проведении проектно-конструкторских работ была спроектирована трехмерная геометрическая модель насадочного динамометра.

Расчет пружинных элементов выполнялся в программе ANSYS на основании разработанной трехмерной модели динамометра.

## **Проектирование и изготовление динамометра. Проектирование конструкции динамометра**

Dynamometer design and manufacture. Design of dynamometer construction

Динамометр – прибор для измерения силы или момента силы – состоит из силового звена (упругого элемента) и отсчетного устройства. В силовом звене измеряемое усилие вызывает деформацию, которая непосредственно или через передачу сообщается отсчетному устройству.

Упругий элемент упора имеет форму полового цилиндра с несколькими г-образными лепестками, которые и являются частями упругого элемента, подвергающимся деформации изгиба под воздействием создаваемой моделью винта осевой силы на насадке модели. В зависимости от направления прилагаемой силы упругий элемент укорачивается или удлиняется, при этом деформации пропорциональны приложенной силе и имеют величину порядка 0,25 мм при верхнем значении силы упора.

Функцию преобразования деформации упругого элемента в электрический сигнал осуществляет дифференциальный индуктивный частотный преобразователь, магнитная система которого расположена внутри упругого элемента, вдоль продольной оси динамометра. Индуктивный преобразователь (ИП) состоит из четырех ферритовых броневых сердечников, два из которых имеют катушки индуктивности и механически связаны с одним концом упругого элемента, а два других не имеют катушек и механически связаны с другим концом упругого элемента, выполняя роль замыкающих магнитный поток элементов.

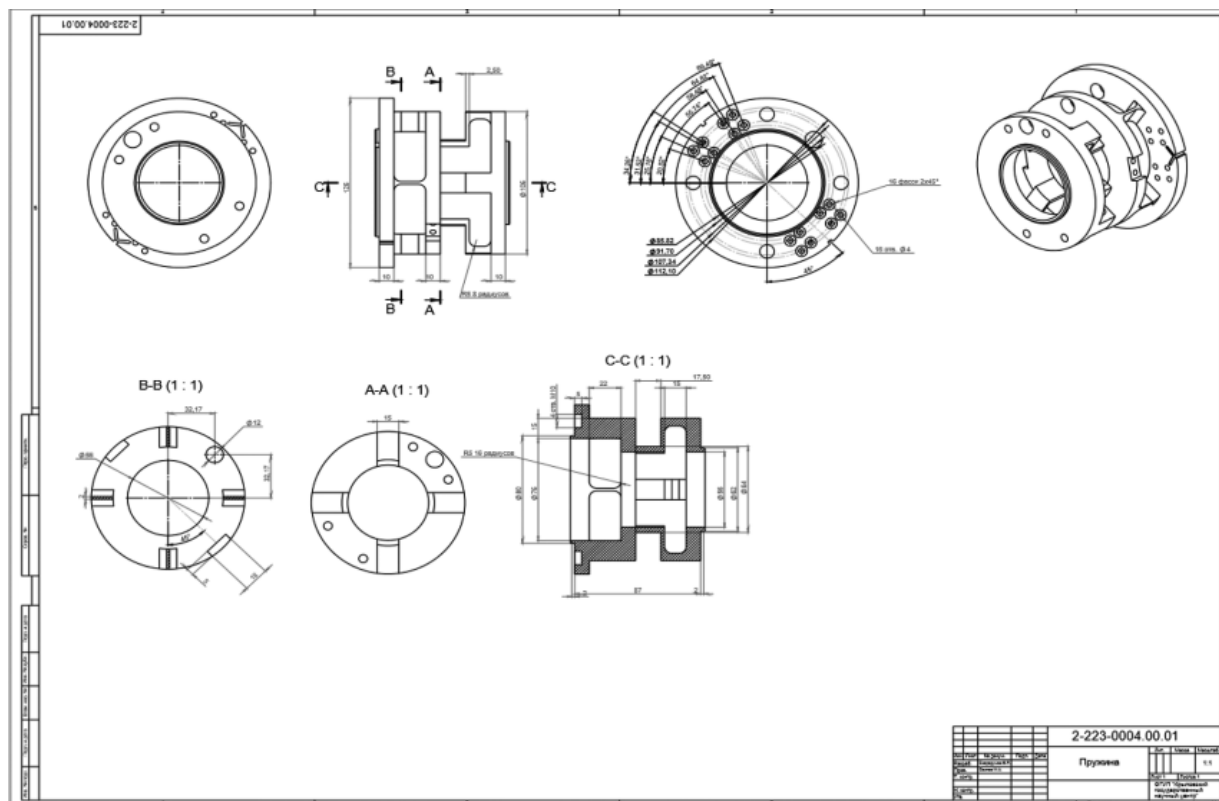
Под действием осевой силы упругий элемент укорачивается или удлиняется, благодаря чему один из зазоров между сердечниками уменьшается, а другой – увеличивается. Изменение зазоров в магнитных системах приводит к изменению магнитного сопротивления и, как следствие, к дифференциальному изменению индуктивности преобразователя.

Изменение индуктивностей, включенных в частотозависимые цепи генераторов электронной схемы, приводит в свою очередь к изменению частоты электрического сигнала на выходе ИП.

Общая конструкция разрабатываемого динамометра состоит из нескольких частей: пружинный элемент, измерительный элемент, стаканы разной длины для крепления направляющего аппарата, хомут крепления динамометра к дейдвуду модели, частотный модуль, система сбора данных и их обработки. Конструкция пружины представлена на рис. 5.

Измерительный компонент (ИК) крепится непосредственно к пружинному элементу. В его состав входят детали (рис. 6), закрепленные на подвижных частях пружины и неподвижных частях, герметичные катушки с ферритовыми сердечниками. Измерительных модулей на динамометре четыре: два, отвечающие за силу упора, и два, отвечающие за силу момента. Из-за ограничений по габаритам упорная и силовая пружины расположены последовательно, и вторая пружина на 180° относительно первой.

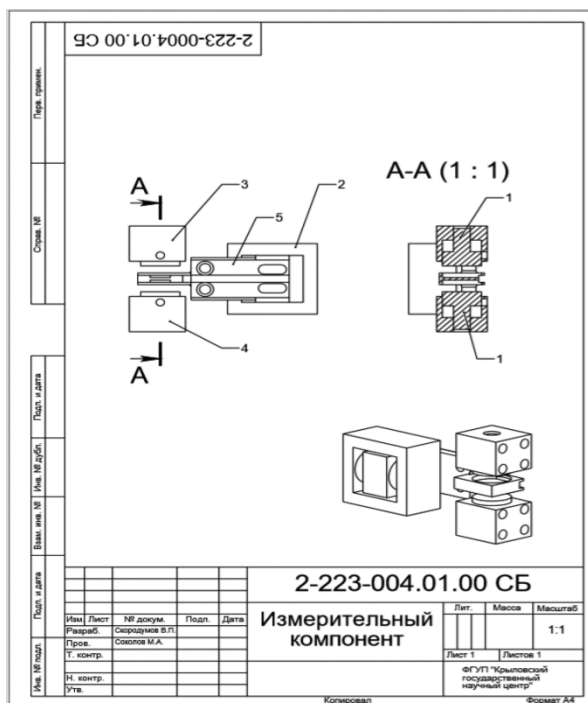
Электрические схемы ИП упора и ИП момента идентичны и отличаются лишь номинальными значениями отдельных настроечных элементов. Они выполнены на печатных платах из фольгированного двухстороннего стеклотекстолита и размещены внутри герметичного отсека, стыкуемого с корпусом динамометра. Принципиальная электрическая схема ИП приведена на рис. 7.



**Рис. 5.** Рабочий чертеж пружинного элемента  
**Fig. 5.** Detail drawing of spring element

**Рис. 6.** Рабочий сборочный чертеж измерительного компонента: 1 – державки катушки с ферритовым сердечником в моментной части измерительного компонента; 2 – подвижная державка катушки с ферритовыми сердечниками в упорной части измерительного компонента; 3, 4 – крепления державок 1; 5 – центральная неподвижная державка с креплением катушек с ферритовыми сердечниками

**Fig. 6.** Detail assembly drawing of measuring element:  
1 – holder of ferrite coil in torque measuring element;  
2 – moving ferrite coil in thrust measuring element;  
3, 4 – fixture of holders 1; 5 – fixed central holder with ferrite coils



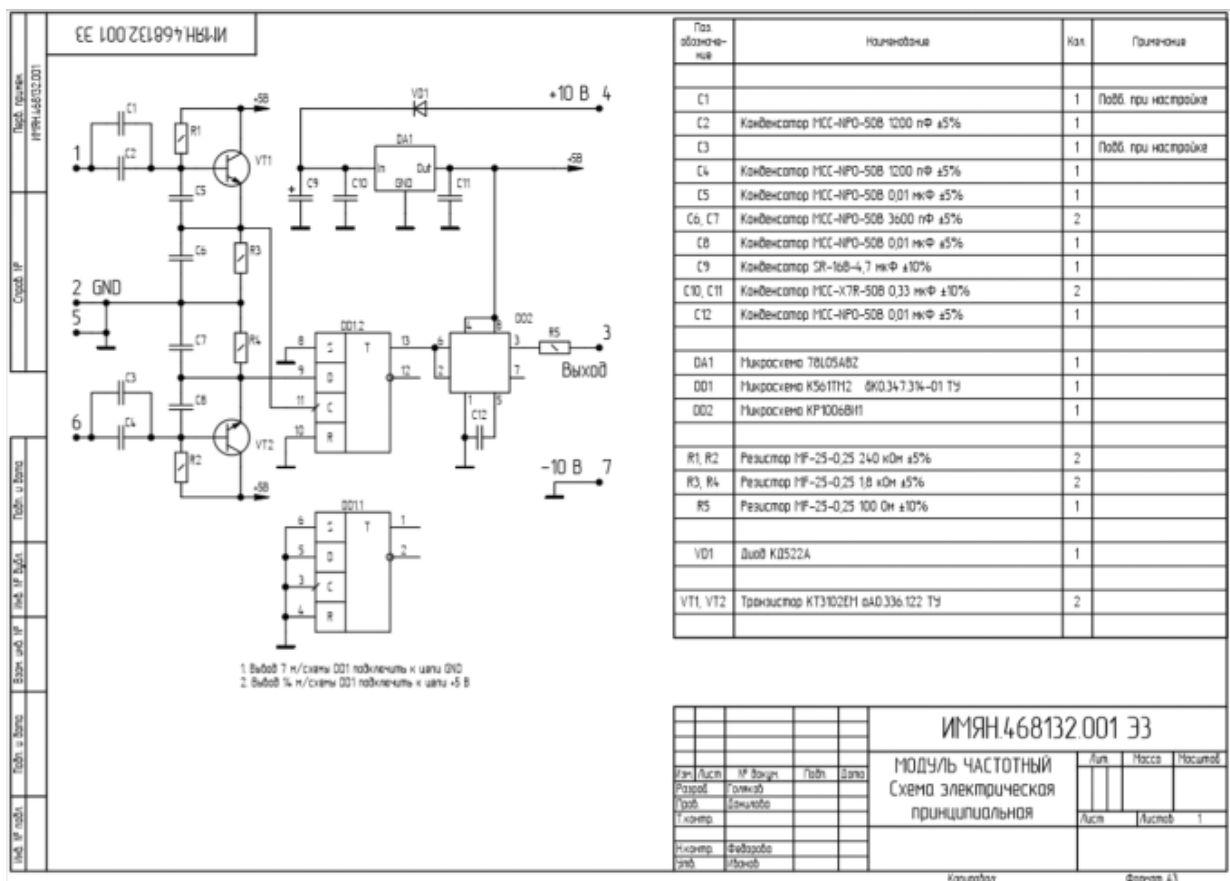


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема  
Fig. 7. Schematic circuit diagram

Катушки индуктивности вклеены в державки, преобразователи L1 и L2 включены в колебательный контур LC-генераторов, собранных на транзисторах VT1 и VT2. Номиналы элементов контуров подбираются таким образом, чтобы разница частот генераторов составляла порядка 5–7 кГц. При этом на выходе триггера DD1.2 (вывод 13 микросхемы DD1) формируется сигнал разностной частоты генераторов. Эта частота условно считается «нулевой» частотой ИП, присутствующей без прилагаемых нагрузок.

При действии на динамометр измеряемых сил индуктивность колебательных контуров генераторов дифференциально меняется. При этом на выводе 13 микросхемы DD1 частота сигнала меняется пропорционально приложенной к динамометру нагрузке. Далее частотно-модулированный сигнал усиливается микросхемой DD2 и подается на выход ИП для регистрации цифровым регистратором (частотомером). Разница между «нулевой» и по-

лученной частотой сигнала и является измеренной величиной.

Питание ИП осуществляется стабилизированным напряжением +5 В, вырабатываемым микросхемой DA1.

### Расчет пружинного элемента насадочного динамометра для глубоководного опытового бассейна численным методом

Design of the duct dynamometer's spring element for numerical tests in deep-water tank

На основании выполненного анализа и предварительных расчетов в конструкции насадочного динамометра выделен основной рабочий элемент, который определяет прочность конструкции в целом, – пружинный элемент, внешний вид которого представлен на рис. 8. Расчет этого элемента и был выполнен.

Расчет нескольких вариантов пружинных элементов выполнялся в программном комплексе Workbench на основании разработанной трехмерной модели динамометра.

Силовая конструкция пружинного элемента выполнена из алюминиевого сплава Д16, имеющего высокие прочностные свойства. Состав сплава регламентирован требованиями ГОСТ 4784-97. В качестве легирующих элементов в нем присутствуют медь, магний и марганец. Сплав обладает малым удельным весом, высокой пластичностью, малой тепло- и электропроводностью, не склонен к растрескиванию.

Величина нагрузки, действующей на пружинный элемент, составляла 1000 Н. Статическая нагрузка моделировалась с помощью равномерно распределенной нагрузки на соответствующей поверхности. Величина крутящего момента на насадке составляет 35 Н·м. Данные воздействия прикладывались к модели двумя шагами нагружения.

Далее приведены результаты численных экспериментов финального варианта пружинного элемента.

Выполнено исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) пружинного элемента при заданных воздействиях.

На рис. 9 (см. вклейку) представлены деформированные состояния (в суммарных перемещениях) пружинного элемента при заданном силовом воздействии.

Как видно из представленных рисунков величина перемещения пружинного элемента под действием упора и крутящего момента на насадке в точке установки катушек не превышает заданную величину: 0,1–0,14 мм.

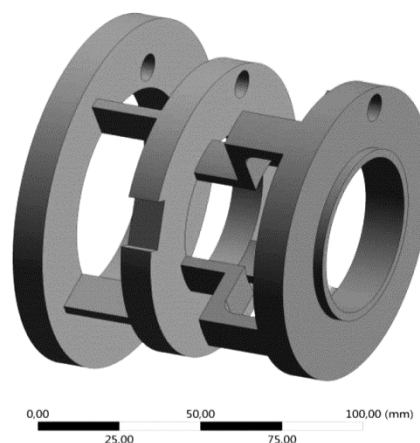
На рис. 10 (см. вклейку) приведены распределения напряжений по Мизесу  $\sigma_{eqv}$ , действующих в пружинном элементе при действии заданного силового воздействия, которые определяются соотношением

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}, \quad (2)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Таким образом, спроектирован пружинный элемент насадочного динамометра со следующими характеристиками:

- Величина перемещения пружинного элемента под действием крутящего момента на насадке  $\pm 35$  Н·м составляет  $\pm 0,1$  мм в точке установки катушек. Перемещения в заданном диапазоне нагрузок линейны. Пружинный элемент



**Рис. 8.** Внешний вид пружинного элемента  
**Fig. 8.** External view of spring element

выдерживает нагрузки до  $\pm 70$  Н·м без остаточных деформационных изменений.

- Величина перемещения пружинного элемента под действием упора на насадке  $\pm 1000$  Н составляет  $\pm 0,1$  мм в точке установки катушек. Перемещения в заданном диапазоне нагрузок линейны. Пружинный элемент выдерживает нагрузки до  $\pm 2300$  Н без остаточных деформационных изменений.

Определены величины перемещений различных вариантов пружинного элемента под действием нагрузки и крутящего момента на насадке, выбран вариант исполнения пружинного элемента, у которого данные величины составляют 0,1–0,14 мм в точке установки катушек.

## Список использованной литературы

- Современные гидродинамические лаборатории / В.О. Борусевич, А.А. Русецкий, К.Е. Сазонов, И.А. Соловьев. Санкт-Петербург : Крыловский гос. науч. центр, 2019. 316 с.
- Горшков А.С., Борусевич В.О., Русецкий А.А. Кавитационные трубы. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2007. 252 с.
- ИМЯН 25-414-13 ПА. Программа метрологической аттестации и калибровки. Санкт-Петербург : Крыловский гос. науч. центр, 2014.
- ИМЯН 147-345-03 ПА. Индуктивные частотные датчики. Программа метрологической аттестации и калибровки. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2003.
- Современные зарубежные судостроительные гидродинамические лаборатории : [Обзор]. [Ленинград] :



- Судостроение, 1969. 208 с. (Новая техника в судостроении / Центр. науч.-исслед. ин-т им. акад. А.Н. Крылова).
6. *Сазонов К.Е.* Модельный эксперимент в океанологии. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2011. 92 с.

#### References

1. Modern hydrodynamic laboratories / *V.O.Borusevich, A.A. Rusetsky, K.E. Sazonov, I.A. Soloviev.* St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2019. 316 p. (*in Russian*).
2. Gorshkov A.S., Borusevich V.O., Rusetsky A.A. Cavitation tunnels. St. Petersburg, 2007. 252 p. (*in Russian*).
3. ИМЯН 25-414-13 ПА. Program of metrological certification and calibration. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2014 (*in Russian*).
4. ИМЯН 147-345-03 ПА. Inductive frequency transducers. Program of metrological certification and calibra-

- tion. St. Petersburg: Krylov Shipbuilding Research Institute, 2003 (*in Russian*).
5. Modern ship hydrodynamic laboratories abroad:[review]. [Leningrad]: Sudostroenie, 1969. 208 p. / (New technology in shipbuilding/ Krylov Shipbuilding Research Institute).
  6. *Sazonov K.E.* Model experiment in oceanology. St. Petersburg: RGGMU, 2011. 92 p.

#### Сведения об авторе

*Скородумов Владислав Павлович*, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196458, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: vladskoro75@gmail.com.

#### About the author

*Vladislav P. Skorodumov*, Engineer of Krylov State Research. Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe sh., 44. 196158, St. Petersburg, Russia. E-mail: vladskoro75@gmail.com.

Поступила / Received: 14.07.23  
Принята в печать / Accepted: 27.07.23  
© Скородумов В.П., 2023