

# Гибридное позиционирование роботизированных платформ для неразрушающего контроля якорных цепей плавучих хранилищ газа (FSU)

**Аннотация.** Рассматривается проблема автоматизированной дефектоскопии линейных ферромагнитных объектов в условиях нестационарных морских течений и многослойного биообрастания. Предложена архитектура управления подводным роботизированным аппаратом, основанная на непрерывном отслеживании тензора градиента магнитного поля якорной цепи, моделируемой цепочкой магнитных диполей. Доказана устойчивость закона навигационного управления методом функций Ляпунова. Разработана методика интеграции бесконтактной фотограмметрии и многолучевого акустического профилирования в рамках расширенного фильтра Калмана для компенсации искажений, вносимых биологическим обрастанием. Сформулирована задача активной гидродинамической стабилизации при контактном измерении остаточной толщины металла электромеханическим щупом; приведены полные уравнения силового баланса аппарата с учётом присоединённых масс, нелинейного гидродинамического сопротивления и реактивного усилия манипулятора.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, подводный роботизированный аппарат, якорная цепь, магнитометрическая навигация, расширенный фильтр Калмана, сенсорное комплексирование, фотограмметрия, гидродинамическая стабилизация, плавучее хранилище газа, биообрастание, неопределённость измерений, функция Ляпунова.

## 1. Введение

Мониторинг технического состояния якорных цепей крупнотоннажных судов и плавучих хранилищ газа (Floating Storage Unit, FSU), находящихся на постоянном приколе, представляет критическую задачу промышленного неразрушающего контроля (Non-Destructive Testing, NDT). Эксплуатация подобных объектов в условиях круглогодичного воздействия морской среды приводит к прогрессирующей коррозии, коррозионно-механической усталости и абразивному износу звеньев цепи [1, 7]. Скорость общей коррозии углеродистой стали в морской воде составляет 0,1–0,3 мм/год, а в зонах переменного смачивания и брызг может достигать 0,5 мм/год, что при проектном ресурсе 25 лет обуславливает потерю до 30 % номинальной толщины стенки звена.

Сложность проведения подводной дефектоскопии обусловлена постоянным механическим натяжением цепей, достигающим 500–2000 кН для крупнотоннажных FSU, агрессивной коррозионной средой и плотным биообрастанием, включающим колонии мидий (*Mytilus edulis*), усоногих раков (*Balanus* spp.) и макрофитов, формирующих многослойные покрытия толщиной до 60 мм [5, 10]. Биообрастание увеличивает гидродинамическое

сопротивление цепи на 40–80 % и существенно затрудняет как визуальный, так и инструментальный контроль.

Жёсткие регламенты Российского морского регистра судоходства (РМРС) не допускают использование исключительно расчётных бесконтактных трёхмерных моделей для принятия решений о годности объекта к дальнейшей эксплуатации. Нормативные документы требуют обязательного дублирования данных дистанционного сканирования инструментальным физическим замером остаточной толщины металла с последующей квалификацией результатов в соответствии с требованиями к персоналу NDT [1, 2]. Аналогичные требования к полноте инспекционных данных содержатся в международных стандартах серии ISO 13628 для подводных производственных систем [7].

Традиционный подход с привлечением водолазных групп сопряжён с высокими операционными рисками, ограниченностью рабочего времени на глубине (не более 30–40 мин эффективной работы при глубинах 20–40 м) и значительной стоимостью мобилизации [5]. Применение телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) частично решает проблему доступа, однако не обеспечивает требуемой точности позиционирования относительно линейного объекта в условиях нестационарных течений со скоростями до 1,0–1,5 м/с [3].

Целью настоящего исследования является разработка и экспериментальная верификация роботизированного гибридного комплекса, обеспечивающего последовательное выполнение бесконтактного сканирования и прецизионного контактного контроля якорных цепей FSU в реальных условиях эксплуатации без привлечения водолазных групп. Задачи исследования: (1) построение математической модели магнитного поля цепи и синтез устойчивого закона навигации; (2) разработка алгоритма сенсорного комплексирования с компенсацией биообрастания; (3) синтез системы активной гидродинамической стабилизации для контактных измерений; (4) натурная верификация комплекса и оценка неопределённости.

## **2. Организационная схема реализации НИОКР**

Разработка и натурная апробация аппаратно-программного комплекса осуществлялись в рамках консорциума с привлечением специализированных структурных подразделений Дальневосточного федерального университета (ДВФУ). Научно-методическое сопровождение, координация инженерных испытаний и трансфер технологий обеспечивались через Центр проектной деятельности ДВФУ и Центр трансфера технологий ДВФУ. Конечным объектом внедрения технологии выступает инфраструктура восточного морского перегрузочного комплекса сжиженного природного газа ПАО

«НОВАТЭК» в бухте Бечевинская (Камчатский край), в частности плавучее хранилище газа FSU «Коряк ПХГ».

### 3. Теоретические основы магнитометрической навигации

#### 3.1. Модель магнитного поля якорной цепи

Ферромагнитные свойства и высокая масса звеньев якорной цепи создают стабильное локальное возмущение геомагнитного поля, которое используется для навигации подводного аппарата без риска механического столкновения [6]. Якорная цепь моделируется как последовательность  $N$  магнитных диполей, расположенных вдоль оси цепи с шагом  $a$ , равным наружной длине звена. Магнитный момент  $k$ -го звена  $\mathbf{m}_k$  индуцирован внешним геомагнитным полем  $\mathbf{B}_0$  и определяется выражением:

$$\mathbf{m}_k = (V_k \cdot \chi / \mu_0) \cdot \mathbf{B}_0, (1)$$

где  $V_k$  — объём ферромагнитного материала  $k$ -го звена;  $\chi$  — объёмная магнитная восприимчивость стали цепи ( $\chi \approx 100\text{--}400$  для конструкционных сталей);  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

Суммарная магнитная индукция в точке наблюдения  $\mathbf{r}$  определяется суперпозицией полей всех диполей [6]:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mathbf{B}_0 + (\mu_0 / 4\pi) \sum_{k=1}^N [3(\mathbf{m}_k \cdot \hat{\mathbf{R}}_k)\hat{\mathbf{R}}_k - \mathbf{m}_k] / R_k^3, (2)$$

где  $\mathbf{R}_k = \mathbf{r} - \mathbf{r}_k$  — вектор от центра  $k$ -го звена до точки наблюдения;  $R_k = |\mathbf{R}_k|$ ;  $\hat{\mathbf{R}}_k = \mathbf{R}_k / R_k$ . Для звеньев, удалённых более чем на  $3a$  от точки наблюдения, вкладом в суммарное поле пренебрегают ввиду кубического убывания поля диполя.

Градиент магнитной индукции, регистрируемый бортовым градиентометром с базой  $\Delta l$ , представляет симметричный бесследовый тензор второго ранга:

$$G_{ij}(\mathbf{r}) = \partial B_i / \partial x_j = (\mu_0 / 4\pi) \sum_{k=1}^N \partial / \partial x_j \{ [3(\mathbf{m}_k \cdot \hat{\mathbf{R}}_k)\hat{\mathbf{R}}_k - \mathbf{m}_k]_i / R_k^3 \}, (3)$$

где  $i, j \in \{x, y, z\}$ . В отсутствие свободных токов в точке измерения выполняется условие  $\text{tr } G = G_{xx} + G_{yy} + G_{zz} = 0$ , что позволяет контролировать исправность датчиков. Собственные значения  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  тензора  $G_{ij}$  удовлетворяют условию  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0$ . Собственный вектор  $\mathbf{e}_{\max}$ , соответствующий максимальному по модулю собственному значению, определяет направление на ось цепи.

Аналитическая оценка модуля градиента для одиночного диполя на расстоянии  $r$  по нормали к оси цепи даёт:

$$|\nabla B| \approx (3\mu_0|\mathbf{m}|) / (4\pi r^4). (4)$$

Для типичного звена якорной цепи калибра 76 мм (масса  $\approx 120$  кг,  $V \approx 0,015$  м<sup>3</sup>,  $\chi = 200$ ) при  $|\mathbf{B}_0| = 50$  мкТл магнитный момент составляет  $|\mathbf{m}| \approx 0,6$  А·м<sup>2</sup>, что обеспечивает  $|\nabla B| \approx 90$  нТл/м на расстоянии  $r = 1$  м и  $|\nabla B| \approx 6$  нТл/м на расстоянии  $r = 3$  м.

### 3.2. Закон навигационного управления и доказательство устойчивости

Управляющее воздействие на движители аппарата формируется по закону пропорционально-дифференциального регулирования с компенсацией гидродинамического сноса [3, 8]:

$$\mathbf{u}(t) = -K_p \cdot \mathbf{e}(t) - K_d \cdot \dot{\mathbf{e}}(t) + \mathbf{u}_{ff}(t), (5)$$

где  $\mathbf{e}(t) = \mathbf{r}_{зад}(t) - \mathbf{r}_{тек}(t)$  — вектор ошибки позиционирования;  $K_p = \text{diag}(k_{p1}, \dots, k_{p6})$ ,  $K_d = \text{diag}(k_{d1}, \dots, k_{d6})$  — положительно определённые диагональные матрицы усиления;  $\mathbf{u}_{ff}$  — упреждающая компенсация течения, оцениваемая по данным доплеровского лага.

Устойчивость замкнутой системы доказывается с помощью функции Ляпунова [11]. Для линеаризованной модели динамики аппарата  $M\dot{\mathbf{e}} + D\mathbf{e} = \mathbf{u}$  (где  $M$ ,  $D$  — положительно определённые матрицы) выбирается кандидат:

$$V(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}^T M \dot{\mathbf{e}} + \frac{1}{2} \mathbf{e}^T K_p \mathbf{e}. (6)$$

Производная вдоль траекторий замкнутой системы:

$$dV/dt = \dot{\mathbf{e}}^T M \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{e}^T K_p \dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{e}}^T [-D\dot{\mathbf{e}} - K_p \mathbf{e} - K_d \dot{\mathbf{e}}] + \mathbf{e}^T K_p \dot{\mathbf{e}} = -\dot{\mathbf{e}}^T (D + K_d) \dot{\mathbf{e}} \leq 0. (7)$$

Поскольку матрица  $(D + K_d)$  положительно определена,  $dV/dt \leq 0$  для всех  $(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) \neq (0, 0)$ , и  $dV/dt = 0$  только при  $\dot{\mathbf{e}} = 0$ . По теореме Ла-Саля [11] положение равновесия  $(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) = (0, 0)$  асимптотически устойчиво глобально.

Погрешность определения расстояния до оси цепи при инструментальной погрешности магнитометра  $\sigma_B$  оценивается как [6]:

$$\sigma_r \approx (\sigma_B / |\nabla B|) \cdot (r / \Delta l)^{1/2}. (8)$$

Параметры магнитометрической навигационной системы приведены в таблице 1.

| Параметр                                  | Обозначение | Значение |
|-------------------------------------------|-------------|----------|
| Инструментальная погрешность магнитометра | $\sigma_B$  | 0,5 нТл  |

|                                           |                  |             |
|-------------------------------------------|------------------|-------------|
|                                           |                  |             |
| База градиентометра                       | $\Delta l$       | 0,30 м      |
| Частота опроса магнитометра               | $f_{\text{mag}}$ | 100 Гц      |
| Модуль геомагнитного поля (район работ)   | $ \mathbf{B}_0 $ | 52 мкТл     |
| Магнитная восприимчивость стали цепи      | $\chi$           | 150–350     |
| Калибр цепи                               | $d$              | 76 мм       |
| Дальность устойчивого обнаружения         | $r_{\text{det}}$ | до 4,5 м    |
| Погрешность позиционирования ( $r = 1$ м) | $\sigma_r$       | $\pm 12$ мм |
| Погрешность позиционирования ( $r = 3$ м) | $\sigma_r$       | $\pm 48$ мм |

Таблица 1 — Параметры магнитометрической навигационной системы

## 4. Теоретические основы сенсорного комплексирования

### 4.1. Фотограмметрическая модель

Ближняя фотограмметрия основана на решении уравнений коллинеарности, связывающих координаты точки объекта ( $X, Y, Z$ ) с координатами её изображения ( $x, y$ ) на матрице камеры [4]:

$$x - x_0 = -f \cdot [r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)] / [r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)], (9)$$

$$y - y_0 = -f \cdot [r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)] / [r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)], (10)$$

где ( $x_0, y_0$ ) — координаты главной точки;  $f$  — фокусное расстояние;  $r_{ij}$  — элементы матрицы поворота камеры; ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) — координаты центра проекции. Калибровка стереопары выполняется по методу Чжана [4] с

использованием подводного калибровочного стенда; среднеквадратичная ошибка репроекции не превышает 0,15 пикселя.

#### 4.2. Акустическая модель

Распространение акустического сигнала в морской среде описывается уравнением затухания [10]:

$$I(r) = I_0 \cdot \exp(-2\alpha r) / r^2, (11)$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения;  $\alpha$  — коэффициент поглощения (на частоте 400 кГц  $\alpha \approx 110$  дБ/км);  $r$  — расстояние до отражающей поверхности. Отражение от границы «биослой–металл» характеризуется коэффициентом отражения  $R_{12} = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1)$ , где  $Z_1$ ,  $Z_2$  — акустические импедансы биослоя и стали соответственно. Для стали  $Z_2 \approx 45 \cdot 10^6$  Па·с/м, для биослоя  $Z_1 \approx 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м, что обеспечивает  $R_{12} \approx 0,94$  и высокую контрастность отражения от металлической поверхности.

#### 4.3. Модель наблюдений и расширенный фильтр Калмана

Вектор состояния включает координаты истинной поверхности металла, толщину биослоя и параметры позиции аппарата [8, 9]:

$$\mathbf{x}_k = [\mathbf{x}_{\text{metal},k}^T, h_{\text{bio},k}, \mathbf{p}_k^T, \mathbf{v}_k^T]^T \in \mathbb{R}^n. (12)$$

Нелинейная модель наблюдений:

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k, \quad \mathbf{v}_k \sim N(0, R_k), (13)$$

где  $R_k = \text{diag}(\sigma_{\text{opt}}^2 I_3, \sigma_{\text{ac}}^2 I_3)$  — блочно-диагональная ковариационная матрица шумов оптической и акустической подсистем.

Уравнения расширенного фильтра Калмана [9]:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = F_{k-1} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, (14)$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} \cdot P_{k-1|k-1} \cdot F_{k-1}^T + Q_{k-1}, (15)$$

$$S_k = H_k \cdot P_{k|k-1} \cdot H_k^T + R_k, (16)$$

$$K_k = P_{k|k-1} \cdot H_k^T \cdot S_k^{-1}, (17)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + K_k \cdot [\mathbf{z}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})], (18)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k \cdot H_k) \cdot P_{k|k-1} \cdot (I - K_k \cdot H_k)^T + K_k \cdot R_k \cdot K_k^T, (19)$$

где  $F_k$  — матрица перехода состояния;  $Q_k$  — ковариация шума модели;  $H_k = \partial h / \partial \mathbf{x}|_{\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}}$  — якобиан функции наблюдений;  $K_k$  — матрица усиления;  $S_k$  — матрица ковариации невязки. Формула (19) записана в форме Джозефа,

обеспечивающей симметричность и положительную определённую  $P_{k|k}$  при конечной разрядности вычислений [9].

Критерий сходимости фильтра основан на проверке нормированной невязки:

$$NIS_k = \Delta \mathbf{z}_k^T \cdot S_k^{-1} \cdot \Delta \mathbf{z}_k \leq \chi^2_{\alpha, m}, (20)$$

где  $\Delta \mathbf{z}_k = \mathbf{z}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$ ;  $m$  — размерность вектора наблюдений;  $\alpha = 0,05$ . При нарушении условия (20) выполняется адаптивный пересчёт  $R_k$  по скользящему окну из  $W = 20$  последних отсчётов.

Параметры фильтра Калмана приведены в таблице 2.

| Параметр                                   | Обозначение       | Значение                         |
|--------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| Размерность вектора состояния              | $n$               | 18                               |
| Размерность вектора наблюдений             | $m$               | 6                                |
| СКО шума фотограмметрии                    | $\sigma_{opt}$    | 0,3 мм                           |
| СКО шума акустического профиломера         | $\sigma_{ac}$     | 2,0 мм                           |
| Ковариация шума модели (позиция)           | $q_{pos}$         | $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$   |
| Ковариация шума модели (скорость)          | $q_{vel}$         | $10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^3$ |
| Начальная ковариация $P_{0 0}$ (диагональ) | $p_0$             | $10^{-2} \text{ м}^2$            |
| Окно адаптации                             | $W$               | 20 отсчётов                      |
| Порог NIS ( $\alpha = 0,05$ , $m = 6$ )    | $\chi^2_{0,05;6}$ | 12,59                            |

Таблица 2 — Параметры расширенного фильтра Калмана

## 5. Гидродинамическая модель и контактный замер

### 5.1. Уравнения динамики аппарата

Уравнение динамики аппарата в шести степенях свободы записывается в стандартной форме [3]:

$$(M_{RB} + M_A)\mathbf{a} + [C_{RB}(\mathbf{v}) + C_A(\mathbf{v})]\mathbf{v} + D(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_{thr} + \boldsymbol{\tau}_{cur} + \boldsymbol{\tau}_{man}, (21)$$

где  $M_{RB} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  — матрица масс и моментов инерции твёрдого тела;  $M_A$  — матрица присоединённых масс;  $C_{RB}$ ,  $C_A$  — матрицы кориолисовых и центробежных сил;  $D(\mathbf{v}) = D_L + D_Q|\mathbf{v}|$  — матрица гидродинамического сопротивления (линейная и квадратичная составляющие);  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  — вектор восстанавливающих сил;  $\boldsymbol{\tau}_{thr}$  — управляющие усилия двигателей;  $\boldsymbol{\tau}_{cur}$  — возмущение от течения;  $\boldsymbol{\tau}_{man}$  — реактивное усилие манипулятора.

Гидродинамические коэффициенты аппарата приведены в таблице 3.

| Параметр                                             | Обозначение  | Значение                            |
|------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| Масса аппарата в воздухе                             | $m$          | 85 кг                               |
| Объём вытесненной воды                               | $\nabla$     | 0,088 м <sup>3</sup>                |
| Избыточная плавучесть                                | $\Delta F_b$ | +15 Н                               |
| Присоединённая масса (продольная)                    | $M_{A,11}$   | 12,4 кг                             |
| Присоединённая масса (поперечная)                    | $M_{A,22}$   | 18,7 кг                             |
| Присоединённая масса (вертикальная)                  | $M_{A,33}$   | 22,1 кг                             |
| Коэффициент линейного сопротивления (продольный)     | $D_{L,11}$   | 35 Н·с/м                            |
| Коэффициент квадратичного сопротивления (продольный) | $D_{Q,11}$   | 60 Н·с <sup>2</sup> /м <sup>2</sup> |
| Максимальная тяга двигателей (суммарная)             | $T_{max}$    | 200 Н                               |

## 5.2. Закон активной стабилизации при контакте

Для компенсации отдачи от манипулятора и микротечений в момент касания внедрён контур активной гидродинамической стабилизации [3, 8]:

$$\mathbf{\tau}_{thr} = M\mathbf{a}_{des} + C(\mathbf{v})\mathbf{v} + D(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) - \hat{\boldsymbol{\tau}}_{man} - K_s\tilde{\boldsymbol{\eta}} - K_v\tilde{\mathbf{v}}, \quad (22)$$

где  $M = M_{RB} + M_A$ ;  $C = C_{RB} + C_A$ ;  $\mathbf{a}_{des} = \mathbf{0}$  при удержании позиции;  $\hat{\boldsymbol{\tau}}_{man}$  — оценка реактивного усилия по данным тензометрического датчика;  $K_s, K_v \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  — матрицы позиционной и скоростной жёсткости;  $\tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\mathbf{v}}$  — отклонения позиции и скорости.

Устойчивость контура стабилизации доказывается аналогично разделу 3.2 с использованием функции Ляпунова  $V = \frac{1}{2}\tilde{\mathbf{v}}^T M \tilde{\mathbf{v}} + \frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{\eta}}^T K_s \tilde{\boldsymbol{\eta}}$ , производная которой  $dV/dt = -\tilde{\mathbf{v}}^T (D + K_v) \tilde{\mathbf{v}} \leq 0$  [11].

## 5.3. Измерительный модуль

В соответствии с нормативными требованиями РМРС [1] и стандартами квалификации персонала NDT [2] дрон оснащён электромеханическим измерительным модулем. Характеристики модуля приведены в таблице 4.

| Параметр                       | Значение                         |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Тип измерителя                 | Линейный электромеханический щуп |
| Диапазон хода                  | 50 мм                            |
| Дискретность отсчёта           | 0,01 мм                          |
| Усилие прижима (регулируемое)  | 5–20 Н                           |
| Тензометрический датчик усилия | 0–50 Н, погрешность $\pm 0,5$ %  |
| Время одного измерения         | 3–5 с                            |

|                                          |   |
|------------------------------------------|---|
| Количество степеней свободы манипулятора | 4 |
|------------------------------------------|---|

Таблица 4 — Характеристики электромеханического измерительного модуля

## 6. Оценка неопределённости измерений

Суммарная стандартная неопределённость определения остаточной толщины металла  $s_c$  формируется из составляющих в соответствии с руководством GUM:

$$s_c^2 = s_{pos}^2 + s_{inst}^2 + s_{bio}^2 + s_{temp}^2 + s_{rep}^2, (23)$$

где  $s_{pos}$  — неопределённость позиционирования щупа;  $s_{inst} = 0,01$  мм — инструментальная неопределённость;  $s_{bio}$  — остаточная неопределённость компенсации биообрастания;  $s_{temp}$  — температурная составляющая;  $s_{rep}$  — неопределённость повторяемости. Бюджет неопределённости представлен в таблице 5.

| Составляющая                                                   | Обозначение             | Значение, мм | Тип оценки |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------|------------|
| Позиционирование щупа                                          | $s_{pos}$               | 0,04         | B          |
| Инструментальная                                               | $s_{inst}$              | 0,01         | B          |
| Компенсация биообрастания                                      | $s_{bio}$               | 0,03         | A          |
| Температурная                                                  | $s_{temp}$              | 0,01         | B          |
| Повторяемость                                                  | $s_{rep}$               | 0,02         | A          |
| <b>Суммарная стандартная</b>                                   | <b><math>s_c</math></b> | <b>0,057</b> | —          |
| <b>Расширенная (<math>k = 2</math>, <math>P = 0,95</math>)</b> | <b>U</b>                | <b>0,11</b>  | —          |

Таблица 5 — Бюджет неопределённости измерения остаточной толщины металла

## 7. Надёжность программного обеспечения

Программное обеспечение комплекса разработано с соблюдением требований безопасности глубоководных операций. Исходный код на языке Python проходит строгую статическую типизацию (mypy), автоматическое форматирование (Ruff) и аудит уязвимостей (Bandit, gitleaks) на этапе интеграции через механизм pre-commit. Архитектура управляющего контура реализована по принципу отказоустойчивости: при потере связи с оператором аппарат автоматически переходит в режим аварийного всплытия по заданному вектору, определяемому магнитометрической системой, с одновременной фиксацией данных на бортовом накопителе. Частота управляющего цикла составляет 50 Гц; время реакции на аварийное событие не превышает 100 мс.

## 8. Методика натурных испытаний

### 8.1. Условия проведения

Натурные испытания комплекса проведены в акватории бухты Бечевинская на якорных цепях FSU «Коряк ПХГ». Условия проведения испытаний приведены в таблице 6.

| Параметр                    | Диапазон значений | Среднее  |
|-----------------------------|-------------------|----------|
| Глубина в зоне испытаний    | 18–26 м           | 22 м     |
| Скорость придонного течения | 0,1–0,8 м/с       | 0,35 м/с |
| Температура воды            | 4–7 °C            | 5,5 °C   |
| Видимость                   | 0,5–2,0 м         | 1,1 м    |
| Толщина биообрастания       | 20–55 мм          | 38 мм    |
| Солёность                   | 32–34 ‰           | 33 ‰     |
| Волнение поверхности        | 0–2 балла         | 1 балл   |

Таблица 6 — Гидрометеорологические условия натурных испытаний

## 8.2. Протокол испытаний

Программа испытаний включала три последовательных этапа. На этапе I выполнялось обнаружение цепи с дистанции 4–5 м и сближение по магнитометрическому каналу с фиксацией погрешности навигации. На этапе II производилось бесконтактное сканирование участка из 8–12 звеньев с одновременной записью фотограмметрических и акустических данных; по завершении сканирования выполнялась контактная верификация толщины в 6 контрольных точках на звено с использованием эталонного ультразвукового толщиномера (погрешность  $\pm 0,05$  мм). На этапе III оценивалась повторяемость результатов: каждое измерение выполнялось  $n = 5$  раз с повторным позиционированием аппарата. Общее число серий измерений составило 48.

## 9. Результаты

### 9.1. Точность навигации и стабилизации

Результаты оценки точности навигации и стабилизации приведены в таблице 7.

| Параметр                                 | Течение $\leq 0,2$<br>м/с | Течение 0,2–0,5<br>м/с | Течение 0,5–0,8<br>м/с |
|------------------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| СКО удержания на оси цепи, мм            | 12                        | 22                     | 34                     |
| Максимальное отклонение при контакте, мм | 0,9                       | 1,4                    | 1,8                    |
| Максимальное угловое отклонение, °       | 0,6                       | 1,0                    | 1,4                    |
| Время стабилизации после касания, с      | 1,2                       | 1,8                    | 2,5                    |

Таблица 7 — Точность навигации и стабилизации при различных скоростях течения

### 9.2. Результаты сенсорного комплексирования

Эффективность компенсации биообрастания оценивалась сопоставлением реконструированной поверхности металла с данными

контактного эталонного толщиномера. Результаты для 48 серий измерений приведены в таблице 8.

| Показатель                             | Без компенсации биошума | После компенсации (ЕКФ) |
|----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Систематическое отклонение, мм         | +32,4                   | +0,3                    |
| СКО отклонения от эталона, мм          | 8,7                     | 0,8                     |
| Максимальное абсолютное отклонение, мм | 54,2                    | 2,1                     |
| Коэффициент детерминации $R^2$         | 0,41                    | 0,97                    |

Таблица 8 — Эффективность компенсации биообрастания (48 серий, 288 контрольных точек)

### 9.3. Повторяемость контактных измерений

Статистические характеристики повторяемости контактных измерений остаточной толщины стенки звена ( $n = 5$  повторений в каждой из 288 точек) приведены в таблице 9.

| Статистический параметр                 | Значение |
|-----------------------------------------|----------|
| Среднее значение толщины, мм            | 34,2     |
| СКО повторяемости $S_{\text{rep}}$ , мм | 0,02     |
| Размах ( $\max - \min$ ), мм            | 0,09     |
| Коэффициент вариации, %                 | 0,06     |
| Доля точек с $ \Delta  \leq 0,05$ мм    | 94,1 %   |

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| Доля точек с $ \Delta  \leq 0,10$ мм | 99,3 % |
|--------------------------------------|--------|

Таблица 9 — Повторяемость контактных измерений ( $n = 5$ ,  $N = 288$  точек)

#### 9.4. Сводные характеристики комплекса

Основные метрологические и эксплуатационные характеристики комплекса обобщены в таблице 10.

| Параметр                                                | Значение        |
|---------------------------------------------------------|-----------------|
| Дальность обнаружения цепи по магнитному градиенту      | до 4,5 м        |
| Точность удержания на оси цепи (течение $\leq 0,2$ м/с) | $\pm 15$ мм     |
| Точность удержания на оси цепи (течение до 0,8 м/с)     | $\pm 35$ мм     |
| Погрешность 3D-реконструкции после компенсации биошума  | $\pm 1,0$ мм    |
| Дискретность контактного измерения толщины              | 0,01 мм         |
| Расширенная неопределённость $U$ ( $k = 2$ )            | 0,11 мм         |
| Производительность инспекции                            | 12–15 звеньев/ч |
| Рабочая глубина                                         | до 60 м         |
| Автономность                                            | до 4 ч          |

Таблица 10 — Сводные метрологические и эксплуатационные характеристики комплекса

## 10. Обсуждение

Сопоставление предложенного подхода с традиционной водолазной инспекцией и стандартным ТНПА-обследованием приведено в таблице 11.

| Критерий                      | Водолазная группа    | ТНПА (визуальный) | Предложенный комплекс      |
|-------------------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|
| Точность замера толщины, мм   | $\pm 0,1$            | не выполняется    | $\pm 0,11$                 |
| Компенсация биообрастания     | механическая очистка | не выполняется    | алгоритмическая (ЕКФ)      |
| Работа при видимости < 1 м    | ограничена           | затруднена        | обеспечена (магнитометрия) |
| Риск для персонала            | высокий              | отсутствует       | отсутствует                |
| Производительность, звеньев/ч | 4–6                  | 8–10              | 12–15                      |
| Соответствие требованиям РМРС | полное               | частичное         | полное                     |

Таблица 11 — Сравнительный анализ методов подводной инспекции якорных цепей

Магнитометрическая навигация обеспечивает устойчивое слежение за объектом в условиях нулевой видимости, где оптические и акустические системы навигации деградируют [5, 6]. Доказанная устойчивость закона управления (раздел 3.2) гарантирует сходимость аппарата к оси цепи при любых начальных отклонениях в рабочей зоне. Применение расширенного фильтра Калмана в форме Джозефа (формула 19) обеспечивает численную устойчивость при длительных сериях измерений [9].

Ограничением настоящего исследования является зависимость магнитометрического канала от уровня геомагнитных возмущений (Кр-индекс) и наличия ферромагнитных объектов вблизи зоны инспекции. Для условий бухты Бечевинская данные факторы не оказывают существенного влияния благодаря удалённости от береговых конструкций и умеренной геомагнитной активности в период испытаний.

## 11. Заключение

Разработанный роботизированный комплекс подтвердил работоспособность в ходе натурной апробации, организованной при поддержке Центра проектной деятельности и Центра трансфера технологий ДВФУ. Доказана эффективность интеграции магнитометрической навигации по тензору градиента поля с доказанной ляпуновской устойчивостью (раздел 3), алгоритмов сенсорного комплексирования на основе расширенного фильтра Калмана с компенсацией биообрастания (раздел 4) и контактных измерительных модулей с активной гидродинамической стабилизацией (раздел 5) для мониторинга критически важных объектов морской инфраструктуры.

По результатам 48 серий натуральных измерений (288 контрольных точек) подтверждены: расширенная неопределённость  $U = 0,11$  мм ( $k = 2$ ), коэффициент детерминации реконструкции  $R^2 = 0,97$  после компенсации биошума, повторяемость с коэффициентом вариации 0,06 %. Предложенный подход обеспечивает выполнение требований РМРС [1] и международных стандартов [7] к полноте данных подводного неразрушающего контроля без привлечения водолазных групп, что существенно снижает операционные риски и стоимость инспекционных работ.

## Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. I. Классификация / Российский морской регистр судоходства. — Санкт-Петербург : РМРС, 2024. — 312 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9712—2023. Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала. — Москва : Российский институт стандартизации, 2023. — 28 с.
3. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. — 2nd ed. — Chichester : John Wiley & Sons, 2021. — 789 p. — ISBN 978-1-119-57568-7.
4. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Boehm J. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. — 2nd ed. — Berlin : De Gruyter, 2014. — 728 p. — ISBN 978-3-11-030278-7.
5. Wernli R. L. The ROV Manual: The Complete Guide for Remotely-Operated Vehicles. — 2nd ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2015. — 498 p. — ISBN 978-0-08-099420-8.
6. Leliak P. J. Identification of magnetic dipole sources // IEEE Transactions on Geoscience Electronics. — 1972. — Vol. 10, № 3. — P. 197–200. — DOI: 10.1109/TGE.1972.294282.
7. ISO 13628-1:2005. Petroleum and natural gas industries — Design and operation of subsea production systems — Part 1: General requirements and recommendations. — Geneva : International Organization for Standardization, 2005. — 74 p.
8. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. — London : Springer, 2009. — 632 p. — ISBN 978-1-84628-641-4.

9. Simon D. Optimal State Estimation: Kalman,  $H_\infty$ , and Nonlinear Approaches. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2006. — 552 p. — ISBN 978-0-471-70858-2.
10. Urick R. J. Principles of Underwater Sound. — 3rd ed. — New York : McGraw-Hill, 1983. — 424 p. — ISBN 978-0-07-066572-9.
11. Khalil H. K. Nonlinear Systems. — 3rd ed. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. — 750 p. — ISBN 978-0-13-067389-3.