

# ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА<sup>1</sup>

**Е.В. Лукоянов**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30.  
E-mail: lukoyanov.egor@mail.ru

**Н.В. Колесов**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30.  
E-mail: kolesovnv@mail.ru

**А.В. Лопарев**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30.  
E-mail: ywuk@mail.ru

**Р.В. Крючков**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30.  
E-mail: romankr@gmail.ru

**Ключевые слова:** автономные подводные аппараты, навигационная система, обнаружение отказов, диагностирование отказов, интервальные наблюдатели, наблюдатели Люенбергера.

**Аннотация:** В работе рассматриваются вопросы диагностирования интегрированной навигационной системы автономного необитаемого подводного аппарата. Предложены и исследованы алгоритмы функционального и тестового диагностирования для решения задач обнаружения и поиска отказов на основе динамических моделей.

## 1. Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) находят на практике все более широкое применение при обследовании подводных акваторий с целью поиска полезных ископаемых, обследования подводных сооружений, поиска затонувших судов и т. п. [1, 2]. В связи с этим вопросам разработки АНПА уделяется большое внимание. В процессе разработки специалистам приходится решать множество сложных комплексных проблем, среди которых также и проблема поддержания работоспособности АНПА. Ее решение опирается на применение разнообразных техник обнаружения и поиска отказов [3–5]. Их использование в отношении АНПА сопровождается необходимостью выполнения целого ряда требований, касающихся не

---

<sup>1</sup> Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 23-79-10071).

только ограничений по ресурсам, но также, в частности, необходимостью реализации асинхронных вычислений в реальном масштабе времени, необходимостью управления АНПА в условиях модельной неопределенности и множественности причин возникающих отказов (аппаратные, программные, ошибки в организации вычислений).

Настоящий доклад посвящен освещению опыта разработки средств диагностирования для систем обработки информации и управления АНПА. Перечень подобных систем достаточно разнообразен. Системное решение проблемы диагностирования таких сложных систем возможно на позициях иерархического подхода, когда компоненты систем разбиваются на уровни сложности, и для каждого уровня разрабатываются свои средства диагностирования. Материал доклада ограничен двумя характерными примерами, относящимися к навигационной системе АНПА и иллюстрирующими использованные техники тестового и функционального диагностирования для уровней распределенных систем и динамических устройств соответственно.

## **2. Тестовое диагностирование навигационной системы подводного аппарата**

Объектом диагностирования в настоящем разделе является распределенная вычислительная подсистема навигационной системы (НС) АНПА. Предполагается, что источником нарушений могут быть не только отказы аппаратуры, но и ошибки в организации вычислений и в используемых программах, допущенные разработчиками. Одним из возможных подходов к тестовому диагностированию распределенной вычислительной системы является диагностирование с параллельной моделью [6]. Этот подход и был применен в данной разработке. Он предполагает, что модель системы встраивается в программное обеспечение, исполняясь параллельно с основным функциональным алгоритмом. Модель предназначена для тестового диагностирования нарушений в адресации обменов между программными модулями (ПМ) системы. В случае использования параллельной модели разработчик сам выбирает встраиваемую модель, обрабатывающую тестовые последовательности в каждом из ПМ, причем делает это так, чтобы упростить и алгоритм построения теста и сам тест, а именно, выбирает линейную модель, которая позволяет использовать алгоритмы построения тестов с асимптотической сложностью, характеризующейся полиномиальной зависимостью от размерности модели. Сокращение сложности используемых алгоритмов построения тестов становится особенно актуально в случае РВС реального времени.

Рассмотрим формальную постановку задачи тестового диагностирования бортовой распределенной вычислительной системы реального времени с использованием параллельной модели. Одним из возможных вариантов параллельной модели является модель с независимыми цепями [6]. В этом случае на первом этапе формируется структура модели, которая представляет собой множество вычислительных путей (трасс), составляющих покрытие дуг графа межмодульных связей исходной системы. При этом под вычислительным путем понимаем последовательность срабатывающих ПМ, соединяющую некоторый вход с выходом. Затем с каждым из полученных путей сопоставляется цепь  $l_j = \{v_i\}_{i=1}^{n_j}$ , из такого числа динамических звеньев  $v_i$ , через сколько ПМ проходит данный путь,  $n_j$  – общее количество звеньев в -ой цепи. Таким образом, структура модели представляет собой множество независимых цепей  $\{l_j\}_{j=1}^m$ , где  $m$  – общее количество независимых цепей в модели. На втором этапе формирования модели определяется вид динамических звеньев. При этом учитывается,

что искомая динамическая модель системы далее используется для построения тестов и что процедура построения тестов упрощается, если модель системы, во-первых, линейна, а во-вторых, управляема и наблюдаема.

Общий вектор состояния цепи  $\mathbf{x}_j(k)$  формируется из векторов состояния звеньев  $\mathbf{x}_{i,j}(k)$ ,  $i = \overline{1, n_j}$ , а с помощью блочных матриц  $\mathbf{F}_j(j(k))$ ,  $\mathbf{G}_j(j(k))$ ,  $\mathbf{H}_j(j(k))$  описывается перенос информации между ПМ системы, а также между ПМ и СД в каждом  $j(k)$ -м информационном обмене. Матрицы в этих уравнениях зависят от текущего значения номера сеанса информационного обмена, т.е. модель является нестационарной. Более того, она является периодически нестационарной, т.к. из-за периодичности входного потока процессы обработки данных в системе периодические.

В терминах модели класс рассматриваемых нарушений определяется как всевозможные искажения матриц этой модели. Основываясь на этих предположениях, требуется разработать тест, являющийся входным воздействием для модели и обнаруживающий указанный класс отказов. Формальное решение поставленной задачи приведено в [6], кроме того, она достаточно хорошо автоматизируется [7].

Исходной информацией для построения параллельной модели вычислительной подсистемы НС и тестов для неё является информационный граф программного обеспечения. В вершинах располагаются программные модули, отвечающие за реализацию конкретной функциональной задачи. На первом этапе синтеза параллельной модели по виду информационного графа отыскивалось множество независимых вычислительных путей, обеспечивающих 100% покрытие его ребер. Для рассмотренного графа НС, состоящего из 25 программных модулей, количество вычислительных путей равнялось 36, при этом минимальный по длине путь состоял из двух программных модулей, а максимальный из восьми. Количество вычислительных путей соответствует количеству независимых цепочек в результирующей параллельной модели. Каждая независимая цепь описывается динамической системой. От длин вычислительных путей напрямую зависит как размерность вектора состояния параллельной модели (в данном случае равна 192), так и длина теста.

На втором этапе для получившейся модели выполняется процедура синтеза тестовых входных воздействий и эталонных реакций модели на эти воздействия. Результирующее количество тестовых и эталонных последовательностей составило 684 для полной проверки графа на отсутствие нарушений в адресации межмодульных обменов. Этот факт был подтвержден в результате практических экспериментов.

### **3. Функциональное диагностирование навигационной системы подводного аппарата**

Второй пример синтеза средств диагностирования для НС АНПА тяжелого класса представляет собой функциональное диагностирование его динамических компонентов. В данном случае рассматривается система косвенной стабилизации платформы гравиметра [8, 9]. Причем изложение фокусируется на использовании так называемых наблюдателей состояния. В научной литературе вопросам построения наблюдателей состояния уделяется большое внимание [10]. Назначение рассматриваемых ниже наблюдателей заключается в оценке вектора состояния в целях диагностирования. При этом является актуальной проблема адекватности используемой модели диагностируемой системы. К сожалению, в большинстве случаев модель системы известна разработчику не в полной мере, что существенно усложняет решение задач диагностирования. Классическим подходом является использование наблюдателей Люенбергера [11], в рамках которого основным предположением

является тот факт, что модель диагностируемой системы полностью известна. В сравнении с классическим подходом интервальные наблюдатели [12,13] используют дополнительные знания о возмущающем воздействии, шумах измерения, а также о неопределенностях параметров модели системы.

В докладе приводятся результаты применения теории интервальных наблюдателей при разработке средств диагностирования для НС АНПА. Разработка включала сравнительный анализ технических решений с использованием банка наблюдателей Люенбергера и банка интервальных наблюдателей при решении задачи поиска отказов в динамических компонентах с модельными неопределенностями.

Рассматривалась непрерывная, линейная, стационарная динамическая система со скалярными входом и выходом, определенная на множестве действительных чисел, находящаяся под воздействием возмущения  $d(t)$ . При этом вектор возмущающих воздействий  $\mathbf{d}(t)$  и шум измерений  $v(t)$  не известны, но имеют гарантированные интервалы значений  $\underline{\mathbf{d}}(t) \leq \mathbf{d}(t) \leq \bar{\mathbf{d}}(t)$ ,  $|v(t)| \leq V$ ,  $\forall t \geq 0$ , кроме того для состояния системы неизвестны начальные условия  $\mathbf{x}(0)$ , которые также имеют гарантированный интервал значений  $\underline{\mathbf{x}}_0 \leq \mathbf{x}(0) \leq \bar{\mathbf{x}}_0$ .

Рассматриваемый класс отказов включает в себя параметрические отказы [13], которые можно описать как отклонения значений вектора диагностируемых параметров  $\Theta_i = (\Theta + \Delta\Theta_i)$  от номинальных значений,  $\Delta\Theta_i$  – величина отказа,  $i = \overline{1, k}$ ,  $k$  – количество рассматриваемых отказов в системе.

Задача поиска отказов на основе наблюдателей состояния заключается в построении банка наблюдателей, каждый из которых настроен на соответствующий отказ или, другими словами, его матрица динамики соответствует  $\mathbf{F}(\Theta_i)$ . Поэтому при возникновении в системе отказа, соответствующего  $\Theta_i$ , невязка между выходным сигналом диагностируемой системы и выходом наблюдателя с матрицей динамики  $\mathbf{F}(\Theta_i)$  будет стремиться к нулю при  $\mathbf{d}(t) = 0$ , в отличие от невязок, формируемых остальными наблюдателями в банке. Таким образом, оценивая значения вектора невязок, можно судить о месте отказа в диагностируемой системе. Формальное решение поставленной задачи приведено в [14].

Любой морской объект подвержен воздействию морской качки и АНПА не является исключением. Значения углов ориентации, вырабатываемых БИНС, в общем случае могут быть использованы различными системами управления – авторулевым, системой стабилизации гравиметра, системой стабилизации обследовательской фото/видеокамеры, гидроакустическим комплексом и др. В качестве примера была рассмотрена динамическая модель безредукторной следящей системы косвенно стабилизированной платформы гравиметра, наиболее чувствительная к внешним возмущениям в виде качки. Система описывается дифференциальными уравнениями четвертого порядка [15]. В процессе моделирования амплитуды гармоник компонент вектора возмущающих воздействий  $\mathbf{d}(t)$  увеличивались по шкале: 10%, 50%, 100% от начальных значений. В качестве отказа было рассмотрено периодическое, скачкообразное изменение коэффициента крутящего момента двигателя  $\Theta_1 = K_d + \Delta K_{d,1}$ , где  $\Delta K_{d,1}$  – уровень величины отказа, который в процессе моделирования увеличивался по шкале: 10%, 50%, 100% от номинального значения  $K_d$ . Для демонстрации эффективности предлагаемых решений на основе банка интервальных наблюдателей, будем сравнивать их работу с решениями, базирующимися на использовании банка классических наблюдателей Люенбергера. В обоих случаях банк будет состоять из двух наблюдателей – один с параметрами  $\Theta$  диагностируемой системы, другой с вектором параметров  $\Theta_1$ . В результате после серий модельных экспериментов с различными значениями уровней отказа и возмущающего воздействия

была получена оценка для вероятности ошибочного определения технического состояния системы. Было продемонстрировано, что увеличение величины отказа влечет за собой уменьшение вероятности ошибки диагностирования, а увеличение уровня возмущающего воздействия приводит к её увеличению как для банка наблюдателей Люенбергера, так и для банка интервальных наблюдателей. Однако, при малых уровнях отказа (отклонение – 10%) и максимальном уровне возмущающих воздействий (отклонение – 100%), при использовании банка интервальных наблюдателей корректно определяется техническое состояние системы (вероятность ошибки на уровне 25%), тогда как в случае использования банка наблюдателей Люенбергера средства диагностирования работают с вероятностью ошибки на уровне 50%, что не позволяет решить задачу диагностирования.

#### 4. Заключение

В работе приводятся результаты разработки средств диагностирования для НС АНПА. При этом были использованы как техника тестового, так и техника функционального диагностирования. Для тестового диагностирования был применен подход с синтезом параллельной диагностической модели. Для рассматриваемой НС АНПА была разработана модель и построены тесты, обеспечивающие обнаружение всех отказов, связанных с нарушением в адресации межмодульных обменов. В рамках функционального диагностирования рассмотрен уровень динамических устройств АНПА. На примере безредукторной следящей системы косвенно стабилизированной платформы проведено сравнение эффективности решения задачи поиска отказа на основе банка наблюдателей Люенбергера, а также банка интервальных наблюдателей.

#### Список литературы

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: Изд. ИПМТ ДО РАН, 2018. 368 с.
2. Ramírez I.S. et al. Autonomous underwater vehicles and field of view in underwater operations // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 3. P. 277.
3. Zhu Y. et al. An intelligent fault-tolerant strategy for AUV integrated navigation systems // 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2015. P. 269-274.
4. Шумский А.Е., Жирабок А.Н., Гаджиев Ч. Диагностирование и отказоустойчивое управление динамическими системами // Электронное издание. Владивосток: Изд. ДВФУ, 2016. 178 с.
5. Baraniuk T., Simoni R., Weihmann L. Fault-tolerant architecture for AUVs // 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV). IEEE, 2018. P. 1-6.
6. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V. Discrete-event diagnostic model for a distributed computational system. Independent chains // *Automation and Remote Control*. 2016. Vol. 77, No. 10. P. 1805-1817.
7. Lukoyanov E.V., Gruzlikov A.M. Automation of dataflow real-time computing system diagnostics // *Journal Scientific and Technical Of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020. Vol. 125, No. 1. P. 94.
8. Киселев Л.В., Костоусов В.Б., Медведев А.В., Тарханов А.Е. О гравиметрии с борта автономного подводного робота и оценках ее информативности для навигации по карте // *Подводные исследования и робототехника*. 2019. №. 1. С. 21-30.
9. Степанов О.А., Носов А. С. Алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории // *Гироскопия и навигация*. 2020. Т. 28, №. 2. С. 109.
10. Escobet T. Puig V., Fuente M.J., Armengol J. Fault diagnosis of dynamic systems. Springer International Publishing, 2018.
11. Kwakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. New York: Wiley-interscience, 1972. Vol. 1. 608 p.

12. Efimov D., Raissi T. Design of interval observers for uncertain dynamical systems // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77. P. 191-225.
13. Mazenc F., Bernard O. Interval observers for linear time-invariant systems with disturbances // Automatica. 2011. Vol. 47, No. 1. P. 140-147.
14. Efimov D.V., Raissi T. Design of Interval Observers for Uncertain Dynamical Systems // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77, No. 2. P. 191-225.
15. Olsson G., Piani G. Digital automation and control systems. St. Petersburg: Nevsky dialect, 2001.