

# РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд  
за придобиване на научната степен "Доктор на науките" в

област на висше образование – 5 Технически науки  
професионално направление – 5.1. Машинно инженерство  
специалност – Метрология и метрологично осигуряване

Автор: доц. д-р инж. Димитър Андонов Дичев

Тема: **МОДЕЛИ И МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ НА ДИНАМИЧНАТА ТОЧНОСТ  
НА СИСТЕМИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ПАРАМЕТРИ НА ДВИЖЕЩИ СЕ ОБЕКТИ**

Рецензент: проф. д-р инж. Бранко Душков Сотиров

## 1. Тема и актуалност на дисертационния труд

Измерването в най-общ смисъл е процес на познание, който притежава редица особености и конкретни характеристики. Исторически този процес се е развивал първо в статичен режим и едновременно с материалното развитие постепенно са навлизали и се развивали и измервания в динамичен режим, пред вид спецификата на обектите на измерване. Тези измервания се използват за изучаване на закономерности на изследваните свойства на подвижни обекти и с определяне на параметрите на тяхното движение. Те се определят най-общо като динамични, т.е. измервания, прилагани от измервателни устройства в условия на динамични въздействия на обекта на измерване. Темата на дисертационното изследване е посветена на изследването на модели и методи за анализ на динамичната точност на устройства, измерващи параметри на движещи се обекти.

Известно е, че измерването/изследването на параметри на движение на подвижни обекти е сложен процес, обуславящ се от взаимодействието на участващите и взаимодействащи си съставляващи като обект и условия на измерване, същност и задача на измерване, принцип, метод и устройство за измерване, резултат и неопределеност/грешка на измерване. Същевременно е налице непрекъснатото развитие и усъвършенстване на съвременните транспортни средства – надводни и подводни кораби, въздухоплавателни и сухопътни превозни средства по отношение на скорост на движение, маневреност, икономичност, безопасност, комфорт и др. В този контекст ролята на динамичните измервания става все по-значима и определяща за редица области, една от които е свързана с определяне на параметрите, характеризиращи пространствено-времето положение, режима на движение и др. на тези транспортни средства.

Основен показател на качеството на измерване е точността на резултата на измерване, която при динамичните измервания в значителна степен се определя от влиянието и на инерционните сили. От качеството на резултата на измерване в значителна степен се определя и ефективността на управление на тези подвижни обекти. Съществуващите многобройни устройства за измерване на параметри на движещи се обекти в повечето случаи са със сложни (и, следователно, скъпи) конструкции, предназначени да осигурят необходимата точност на динамичното измерване и характеризиращи се със значителен дял на стойността на инструменталната съставляваща на сумарната грешка. Към нея следва да се добавят и недостатъци като големи габарити, ненадеждност в екстремални условия, необходимост от специални системи за

подобряване работата на инерционните елементи и т.н. и, основно – най-често незадоволителни стойности на основни метрологични характеристики на устройството за измерване.

В този контекст изследването и разработването на измервателни устройства от ново поколение с по-добро качество и подобрени стойности на метрологичните характеристики, основани на съвременните постижения и ниво на науката и техниката в изследваната област и осигуряването на единството им на измерване е особено актуално.

Разработеният безспорно актуален дисертационен труд е представен в осем логично свързани глави с общ обем от 291 страници, включително въведение (2.5 стр.), заключение с основни резултати и приноси (2 стр.), списък на 22 публикации по дисертацията (2 стр.) и използвана литература (10 стр.). Текстът е добре онагледен със 149 фигури и 11 таблици. Към дисертационната работа са представени и 14 приложения в обем от 94 страници.

## **2. Обзор на цитираната литература**

Библиографията обхваща 207 литературни източника, от които 19 на български, 147 на руски и 41 на английски езици. 20 от цитираните литературни източници (10 на български език и 10 на английски език) са на автора доц. Димитър Дичев.

Тематично литературните източници включват публикации в областите: теория и обработване на сигналите, филтриране и корекция на сигналите, теория на измерването, теория на управлението, изследване на операциите, теория на случайните функции и процеси, стационарни временни редове, статистика и статистическа обработка на резултати от измервания, теория на експеримента и автоматизация на изследванията, теория на кораба, ориентация и навигация, теория на жироскопите, методи и средства за построяване на вертикала, акселерометрия, моделиране и анализ на динамични системи, теоретична и вибрационна механика, диференциално и интегрално смятане, метрология и измервателна техника, теория на динамичните измервания, измерване на вибрации, грешки на измерване, основи на метрологичното осигуряване.

Много от цитираните автори са международно признати авторитети в своите области с фундаментални и значими приноси. Цитирането е подробно и коректно.

Годините на издаване са в интервала 1949 (Winer, N. Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series. John Wiley, N.Y., 1949.) – 2015 год. 89 от литературните източници (43 %) са публикувани след 2000<sup>-та</sup> година.

На база на обширния, задълбочен и аналитичен литературен обзор е формулирана правилно и целта на дисертационния труд - *Разработване на теоретичните основи на измерванията в динамичен режим на параметри на движещи се обекти, и в частност на кораби, с оглед създаване на метод за построяване на измервателни системи, притежаващи висока точност в условия на инерционни въздействия, променящи се в широки граници, и обезпечаване на единството им на измерване.*

За изпълнение на тази цел са поставени за решаване 8 логически свързани задачи.

## **3. Методика на изследване**

Оценявам методологията на изследване като задълбочена, сериозна и адекватна на решаваните задачи. Тя е подчинена на една предварително декларирана в глава I логическа последователност, свързваща отделните глави в едно завършено цяло, предназначено да изпълни поставената цел на дисертационното изследване.

Допълнително, всяка стъпка (глава на дисертацията) на изследването е структурирана така, че се предхожда от теоретичен преглед/анализ на състоянието на решаваната задача.

Изследването започва с дефиниране на основните материални структурни елементи на процеса на измерване – *материалната среда на движението на обекта на измерване, движещия се обект на измерване и устройството за измерване*. Елементите на процеса *sine qua non* (без които не може) са *резултатът от измерване* и неизбежно съпътстващата го *грешка/неопределеност* на измерване.

Глава първа въвежда и дава общо описание на средата на движение, параметрите на движение на подвижните обекти и съществуващите методи за измерване в динамичен режим. На база на анализа на многобройни записи на вълнението е постулиран извода, че вълнението е случаен стационарен процес, а разпределението на ординатите на ветровите вълни в дълбоко море е по нормален закон.

Този важен факт е с определящо значение за цялата методология на изследването.

На базата на анализа на динамичните измервания на стр. 37 е дадено *определение за динамичен режим на измерване*, естествено допълнено в глава 3 от констатацията, че „... от методологична гледна точка, преходът към динамичните измервания е преход от измерването на скаларни величини към измерване на векторни величини, от измерване с краен числов резултат към измерване с резултат във вид на функция, от измерване с цел определяне на постоянна величина към измерване с цел определяне на зависимостта на една величина от времето. В този смисъл, динамичните измервания могат да бъдат отнесени към съвместните измервания на интересувашата ни величина и времето...“.

Глава втора задълбочава изследването на един от най-важните структурни елементи на *измервателното устройство* – методите и средствата за построяване на *вертикала*. Изследвани са характеристиките на системите за построяване на вертикала посредством физично махало, жirosкоп и акселерометър. Посочени са предимствата и недостатъците на анализиранията измервателни устройства.

Глава трета е посветена на изследването на основни характеристики на *движещия се обект* на измерване, представляващи измервани величини – крен, диферент и динамичните им аналози бордово и килево клатене на кораба. Представени са математични модели и са анализирани напречните (напречно-хоризонтални колебания и бордово клатене) и надлъжни (килевото и вертикално клатене и надлъжно-хоризонтални) колебания на кораба, както и математични модели на измерваните величини и смущаващите въздействия в условията на нерегулярно вълнение. Установено е, че последните имат близки по честота и амплитуда стойности, което не позволява филтриране на динамичната грешка. Установено е, че клатенето на кораба представлява случаен стационарен процес, за който е приложим инструментариума на теорията на случайните процеси, а предпочитания метод за изследване на динамичната точност е аналитичния, основан на вероятностни характеристики, получени от статистическа обработка на реални записи на клатенето на кораба в експлоатационни условия.

Глава четвърта е посветена на изследването на *динамиката на измервателното устройство*. С цел избягване на посочени недостатъци на съществуващи системи по отношение на инерционните въздействия е предложен нов метод за разработване на измервателни устройства, предназначен да отстранява в реално време с помощта на допълнителен измервателен канал присъщата на инерциалното пространство динамична грешка. Представен е структурен и математичен модел на измервателното устройство и са решени две оптимизационни по отношение на анализа и синтеза задачи. Математичният

модел представлява система от две диференциални уравнения (4.21) и описва свойствата и характеристиките на измервателната система, установявайки взаимовръзка между показанията и стойностите на измерваната величина, конструктивни параметри и влияещите величини. Това дава възможност да се прогнозира резултатите от измерване при работа на системата в различни условия и да се оптимизират структурата и параметрите ѝ с оглед повишаване на точността на резултата от измерване. Със средствата на съвременното моделиране в средата на програмния продукт Matlab е извършено числено решаване на диференциалните уравнения, описващи отклонението на чувствителния елемент от вертикала и са моделирани механичните движения на структурните елементи на динамичната система. Моделиран е конструктивен модел на механичния модул на устройството за измерване.

Глава 5 като естествен елемент в общата структура и методология на изследване е посветена на изследване на *точността на измерване* - основния качествен показател на *резултата от измерване*. Използван е класическият подход в метрологията, основан на анализ на грешките от измерване, включващ разделянето им на съставляващи, теоретично и експериментално изследване на всяка от съставляващите и синтез на сумарната грешка чрез сумиране на оценките на отделните съставляващи. Изложението започва с обстоен анализ на представените в специализираната литература модели на динамичната грешка. И тук, както в предходната глава е представена структурна схема (модел) и са разработени математични модели на динамичната грешка при инерционни смущаващи въздействия, бордово и килево клатене, крен и диферент на кораб.

Следвайки установената последователност на изследването в глава 6 е извършен синтез на *линейна измервателна система* (устройство за измерване) за параметри на движещи се обекти, структурирана в три успоредни контура. Структурата на основния измервателен канал (първи контур) е предмет на гл. 4 и в този смисъл структурната схема на измервателната система (Фиг 6.1.) е естествено продължение и допълнение на обобщената структурна схема на система за измерване на бордово и килево клатене, крен и диферент на кораб (фиг. 4.1). Получен е математичен модел/диференциални уравнения на изследваната динамична система. Направени са структурният и параметричен синтез на предложени в глава 4 допълнителен измервателен канал (втори контур), предназначен да осигури необходимата точност при определяне на вектора на състоянието в основния измервателен канал. Третият контур е изграден с оглед допълнително подобряване на динамичната точност на системата и е разработен по критерия минимум на средно-квадратичното отклонение на динамичната грешка, за която е прието, че решаващ дял има инерционната и съставляваща. Неговият структурен модел е изграден на база алгоритъма на филтъра на Калман (R. Kalman). Синтезът на първи и втори контури е направен с помощта на два различни принципа – принципа (или метода) на едновременните измервания и принцип, основан на моделите на динамиката на системата и обекта.

Целта на разработената в глава 7 изпитвателна апаратура за измервателни устройства, работещи в динамичен режим е *практическата реализация и проверка* на получените теоретични резултати. Представени са структурни схеми и са разработени стендове за определяне на честотните динамични характеристики и за изследване на динамичната точност на измервателни устройства, работещи на движещи се обекти. Стендът за изследване на динамичната точност е изграден като манипулатор с паралелна структура, изпълнен конструктивно като шестстепенна платформа на Стюард. Разработен е и математичен модел на важни геометрични характеристики и управлението на

хексапода. Изключително важни и положителни са потенциалните *референтни възможности* на разработената апаратурата, разширяващи приложението и за *проверка и калибриране* на измервателни устройства, работещи в динамичен режим на измерване.

Естествен завършек на методологията на изследването е глава 8, където са представени *резултатите от експерименталните изследвания* на динамичните (амплитудно честотни) характеристики и точността на изследваните измервателни устройства. Разработените за целта методики и получени резултати показват, че разработените теоретични постановки и нов метод за измерване могат да бъдат използвани за изграждане на точни измервателни устройства за безжироскопно определяне на параметри на движещи се обекти в условията на динамични въздействия.

Използваният за целите на изследването теоретичен и експериментален инструментариум е широко обхванат, модерен и ефективен. За теоретичното изследване, описание и дефиниране са използвани елементи от теорията на случайните (стационарни) процеси, диференциалното и интегрално смятане, законовата и приложна метрология, математично моделиране на параметри, определящи клатенето на кораб, включващи трансформиране на подвижна координатна система, кинематиката и динамиката на механичните движения. За математично моделиране на линейна измервателна система е използван инструментариум включващ диференциални уравнения и интеграла на Дюамел, както и операторен и спектрален методи. За разработване на моделите на динамичните системи са използвани методи от аналитичната динамика, системи диференциални уравнения и са приложени алгоритми за адаптивната филтрация, включително филтъра на Калман, а за извеждане на теоретичните модели на динамичната грешка са използвани техниките на спектралния анализ. За проверка на предложените математически модели са използвани аналитични и числени методи за решаване на системите уравнения, както и имитационни модели, създадени в средите на приложни програмни пакети като Matlab, Mathcad, Solid Works, LabVIEW. Резултатите от проведените експериментални изследвания са оценени с помощта на известни статистически методи.

#### **4. Приноси на дисертационния труд**

Приемам почти изцяло предложената от доц. Дичев класификация на приносите на дисертационния труд, които с известни редакционни корекции и добавяне на още един научно-приложен принос оценявам така:

##### **4.1 Научни приноси:**

1. Предложен е нов метод за изграждане на устройства за измерване в динамичен режим, основан на безжироскопно определяне на параметри на движещи се обекти, посредством иновативна три канална структурна организация на измервателната система, опростен механичен модул и приложението на съвременни постижения в областта на науката и измервателната техника, позволяващи да се избегнат недостатъците на съществуващи подобни измервателни устройства.

2. За анализ и синтез на измервателни устройства по предложения метод са разработени математически модели, отчитащи влиянието на широк спектър от характеристики на системата вода - кораб - измервателно устройство. На тази основа са разработени коригиращи алгоритми за обработване на измервателните сигнали в реално време и повишаване на точността на измерване.

3. Дефинирана е и е разработен математически модел на динамичната грешка на измервателни устройства, работещи в динамичен режим на измерване. Моделът позволява

да се подобри точността на анализа на динамичната грешка и може да се използва като елемент от функционално-структурната организация на измервателните устройства с оглед повишаване на точността на резултата по критерия минимум на средно-квадратичното отклонение на динамичната грешка на измерване. Това подобрява адаптивността на измервателните устройства в широки граници на изменение на измерваните величини и смущаващите въздействия.

#### **4.2 Научно-приложни приноси:**

1. С помощта на предложения нов метод е разработена реална измервателна система, предназначена за измерване на величините бордово и килево клатене, крен и диферент на кораб, основана на моделите на динамиката на измервателната система и обекта на измерване;

2. За повишаване на точността на динамичното измерване е разработен допълнителен измервателен канал на измервателната система, успореден на основния, чиято хардуерно-софтуерна платформа позволява реализация на коригиращи алгоритми, насочени към отстраняване на динамичната грешка в реално време с помощта на линейни MEMS акселерометри.

3. Предложен е математически модел на алгоритъм на база алгоритъма на филтъра на Калман, целящ допълнително подобряване на динамичната точност на измервателни системи, използващи махалови датчици за вертикала. Той е предназначен да отстрани влиянието на редица второстепенни смущаващи източници от втори порядък, чието сумарно действие може да предизвика значително изкривяване на измервателния сигнал;

4. Разработен е математически модел на алгоритъм за получаване на оптимална оценка на измерваната величина по критерия минимум на средно-квадратичното отклонение на динамичната грешка, основан на действителния модел на динамиката на движещия се обект;

5. Предложено е определение на понятието „динамичен режим на измерване“ и е предложена класификация и определение на термина „динамична грешка на измерване“, дефинирана като грешка, която се обуславя от инерционните свойства на измервателните средства и от динамичната същност на измерваната величина;

6. Предложена е методика за определяне на динамичните честотни характеристики на измервателни устройства за ъглови колебания на движещи се обекти;

7. Разработени са математически модели, предназначени за изграждане на стенд-симулатори за изследване на метрологичните характеристики на измервателни устройства, работещи на кораби. Предложените модели и създаденият на тяхна основа интерфейс за връзка и управление са достатъчно универсални и могат да бъдат използвани при проектиране на други системи за проверка и калибриране на уреди, работещи на различни движещи се обекти;

8. Създадена е стендова апаратура-симулатор за изследване на динамичната точност на измервателни устройства, работещи на движещи се обекти, в това число и на кораби. Стендът-симулатор е с паралелна структура, разработен е на базата на шестстепенна платформа на Стюард и осигурява необходимите чувствителност, маневреност и точност на движение на работната платформа;

9. Разработени са математически модел и изходно измервателно устройство за калибриране на стенд-симулатора, добавящи потенциални референтни свойства на метрологичните му възможности;

10. Предложена е методика за изследване на точността на измерване на измервателни устройства, работещи на плаващи обекти, основана на възможностите на разработения стенд-симулатор.

#### **5. Публикации и цитирания на публикации по дисертационния труд**

Разработването на дисертационния труд е свързано с публикуването на общо 22 статии и доклади (при необходими най-малко 20). От тях 2 (две) са в списание с импакт-фактор (изискуеми 2), 12 (дванадесет) са на български език и 10 (десет) на английски, от които 5 са публикувани в чуждестранни списания и 5 на международни конференции в чужбина. Самостоятелни са 6 (шест) публикации (при необходими най-малко 5), 8 (осем) са с един съавтор, 4 (четири) са с двама, а 4 (четири) публикации са с трима съавтори. Във всичките си публикации доц. Дичев е първи автор.

Представените от доц. Дичев публикации отразяват главните и съществени моменти, приноси и резултати от дисертационния труд, а двадесет са цитирани и в самия труд, поради което приемам, че той е публикуван и представен пред научната общност.

Приемам представената от кандидата доц. Дичев справка и доказателства за известни 16 (шестнадесет) цитирания (при необходими 15) от други автори на 9 (девет) негови статии/доклади, 6 (шест) от които са на английски език.

#### **6. Авторство на получените резултати**

Авторството на кандидата доц. Дичев на гореизброените научни и научно-приложни приноси и получени резултати е безспорно.

Анализът на научните публикации, както и личните ми впечатления от кандидата и негови докладвания на форуми, в които съм бил участник показват, че във всички тях той е водещ или самостоятелен автор. Това твърдение се подкрепя и от дългогодишната работа на доц. Дичев в катедрата, която ръководи, както и от известните ми резултати от изпълнението на редица проекти, свързани с разработваната тематика.

Отчитайки безспорната научна стойност на дисертацията и публикациите приемам, че личният принос и авторство на кандидата в постигането на посочените приноси не подлежи на съмнение и те имат необходимата стойност за научната степен „доктор на науките” по научната специалност на конкурсa.

#### **7. Автореферат и авторска справка**

Авторефератът на дисертационния труд е изложен на 76 страници и е съставен съгласно общоприетите изискванията. Той отразява напълно неговата структура, основни положения, изводи и констатации и съдържа справка за приносите и свързаните с дисертацията публикации на автора.

Както вече отбелязах, приемам авторската справка за приносите почти изцяло с известни корекции и едно допълнение.

#### **8. Забележки, въпроси и препоръки по дисертационния труд**

Нямам принципи забележки към дисертационния труд.

Няколко несъществени терминологични и редакционни забележки и несъответствия съм споделил предварително с автора.

Допълнителна полза за качеството и по-доброто разбиране на този наистина сериозен труд би било, ако се даде повече информация за:

- Как се дефинира центърът на тежест на кораба и как се установява измервателното средство в необходимата начална позиция?;
- Каква е целта на изследването на динамичната точност на някои линейни стационарни измервателни средства, представено в т. 5.1.2.7?;
- Защо в зависимост (6.7) е търсена първа производна на грешката на измерване и какво е физическото и обяснение?;

- Разработената стендова изпитвателна апаратура може да се използва като изходно референтно устройство след валидиране на софтуера за управление и обработване на информацията от измерване.

В допълнение бих отбелязал, че стилистиката на изложението би спечелила, ако някои точки и дори глави (3, 5) бъдат съкратени и/или обединени. Доц. Дичев се е постарал да даде отделно в приложения известни базови теоретични постановки, но в това отношение може да се направи още, което допълнително би спестило обем и би открито по-ясно собствените му приноси и получени резултати. Стремешът на автора да ни въведе в творческата си лаборатория понякога утежнява текста и го импрегнира с множество подробности с риск на моменти да се загуби дори линията на основната теза. Многопластовото лексикално изобилие може би удовлетворява познатия ни академичен етикет, но не бива да е за сметка на добре приеманите яснота и прагматичност на изложението. Използваните и обединявани подходи и терминология от различни научни области предполагат, че би могло да се постигне още и по отношение на лингвистичната семантика и синтактическа структура на изложението.

В заключение следва да заявя, че би било безспорно полезно, ако изследванията и разработването на измервателни системи, основани на разработения от автора метод продължат, включително и чрез използване на други чувствителни елементи. Това ще доведе до разработване и на по-прецизни технологии за редуциране на влиянието на динамичната грешка на измерване.

Резултатите несъмнено биха били от съществена полза не само за метрологичната ни наука, но и за статута и самочувствието ни на морска държава.

#### 9. Заключение

Декларирам, че представеният дисертационен труд **отговаря** на изискванията на Закона за развитие на академичния състав в Република България и му **давам обща положителна оценка**. Постигнатите резултати ми дават основание да **предложа** да бъде придобита научната степен „Доктор на науките” от доц. д-р инж. Димитър Андонов Дичев в:

област на висше образование - 5. Технически науки,  
професионално направление – 5.1 Машинно инженерство,  
специалност – Метрология и метрологично осигуряване.

12.09.2015 г.

Подпис:  
/проф

**Заличено обстоятелство,  
на основание чл.2 от ЗЗЛД**