FRI-1.417-2-MEMBT-08

METHODS FOR INVESTIGATING ACCURACY CHARACTERISTICS OF INSTRUMENTS MEASURING PARAMETERS OF MOVING OBJECTS [9]

Prof. Dimitar Dichev, DSc
Department of Mechanical and Precision Engineering,
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Phone: 066 827 360
E-mail: dichevd@abv.bg

Assoc. Prof. Hristofor Koev, PhD
Department of Mechanical and Precision Engineering,
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Phone: 066 827 273
E-mail: koevh@abv.bg

Assoc. Prof. Hristo Hristov, PhD
Department of Power Engineering,
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Phone: 066 827 222
E-mail: hristo_n_hristov@abv.bg

Momchil Kirinov,
Department of Mechanical and Precision Engineering,
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Phone: 066 827 273
E-mail: m_kirinov@abv.bg

Abstract: *The paper considers a system model for checking and calibrating measuring instruments operating on moving objects, in particular ships. The system is a stand-simulator based on a six-degree-of-freedom Stewart Platform, which ensures the required sensitivity, maneuverability and accuracy of the motion of the operating platform. Methods for determining and investigating the dynamic accuracy of instruments measuring parameters of moving objects have been developed. In addition, the results obtained upon investigating the accuracy characteristics.*

Keywords: *Dynamic measurements, dynamic error, stand-simulator, moving objects.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Експерименталните изследвания обикновено се подразделят на натурни изпитания и изпитания, провеждани в лабораторни условия. При натурните изпитания изследваното измервателно средство функционира според своето пряко предназначение в реални условия на експлоатация. Докато при лабораторните изпитания изкуствено се възпроизвежда връзката между обекта на изследване и условията на експлоатация (Jiang, M. и др., 2016).

От цитираните по-горе определения следва, че по-голяма достоверност би трябвало да имат резултатите, получени от натурните изследвания. От друга страна обаче възможностите за тяхното провеждане и получаването на необходимия обем от информация са твърде ограничени. Провеждането на натурни изпитания на средства за измерване на параметри на подвижни обекти, функциониращи обикновено в състава на сложни системи за управление, изисква пълна готовност не само на обекта на изследване, но и на всички взаимодействащи с

[9] Докладът е представен на на 27 октомври 2017 с оригинално заглавие на български език: МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОЧНОСТНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СРЕДСТВА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ПАРАМЕТРИ НА ДВИЖЕЩИ СЕ ОБЕКТИ

него подсистеми и устройства. Натурните изпитания на всяко ново измервателно средство е продължителен и скъпоструващ процес (Dichev, D. и др., 2016). Освен това при натурните изпитания много трудно могат да бъдат създадени всички условия, необходими за обезпечаване на единството на измерване.

Ето защо съставянето на съответните методики за лабораторни изследвания на точността е актуална задача, решаването на която позволява да се спестят време и средства в етапите на разработване и предварителни изпитания. Основна цел на тази работа е да се разработят методиките за провеждане на точностни изпитания и обработване на информацията, както и да се представят резултатите от изследванията на създадените прототипи на измервателните системи. Резултатите, представени в тази статия се базират на изследване на корабен диферентомер, разработен в ТУ-Габрово.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Характеристика на грешките при динамични измервания

В настоящата работа експерименталното изследване на точностните характеристики ще бъде сведено до изследване на грешката на разработените прототипи в условия, близки до реалните. Грешката при динамичните измервания може да се формулира чрез различни способи, от които най-често използваните са:

- чрез функция на времето $\varepsilon(t)$, определена съгласно уравнение (1) за границите на съответната реализация

$$\varepsilon_{\Sigma}(t) = y(t) - x(t), \tag{1}$$

където $y(t)$ - измерената стойност (представляваща в случая процес на времето); $x(t)$ - референтната стойност;

- чрез максималната грешка ε_{max}, определена като най-голямата по абсолютна стойност грешка от функцията $\varepsilon(t)$;
- чрез средно-квадратичната ú стойност, определена въз основа на (2) за границите на съответната реализация

$$\varepsilon_{de} = \sqrt{\overline{[y(t) - x(t)]^2}} = \sqrt{\lim_{T\to\infty} . \frac{1}{T} . \int_0^T [y(t) - x(t)]^2 . dt}, \tag{2}$$

където T - интервал на осредняване;

- чрез систематичната и случайната ú съставляващи.

Всеки един от тези начини на представяне на грешката характеризира едни или други нейни свойства. Първият способ, за разлика от останалите три, не представя грешката като числова оценка, тъй като дефинира грешката като функция, а не като скалар. От друга страна обаче той характеризира динамиката на грешката, защото определя изменението ú по координатата на времето. Важно значение при съставяне на методиките за експериментално изследване на точността има общата тенденция на изменението на грешката във времето. Защото изменението на грешката представлява случайна функция на времето, за която в отделните последователни моменти от време t_i грешката $\varepsilon_i = \varepsilon(t_i)$ се развива по случаен закон за всяко едно от тези сечения на времето. За всяко сечение t_i на дадената функция $\varepsilon(t)$ може да се намери средна стойност, около която се групират грешките в различните реализации.

В резултат на направеното проучване бе установено, че величините, характеризиращи смущаващите въздействия и предизвикващи динамичната грешка в резултата, представляват ергодични стационарни случайни процеси. Математическото очакване и дисперсията на стационарните случайни процеси са постоянни във времето величини. При което оценката $\widetilde{\varepsilon}$ на математическото очакване $\overline{\varepsilon}$ на стационарната случайна функция на грешката $\varepsilon(t)$ ще се определи за границите на една реализация по формулата

$$\tilde{\varepsilon} = M[\varepsilon(t)] = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \varepsilon(t).dt \,. \tag{3}$$

В математическата статистика е доказано, че всяка стационарна функция може да се представи във вид на нейното спектрално разложение, т.е. (Dichev, D. и др. 2016)

$$\varepsilon(t) = \bar{\varepsilon} + \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i.\omega.t}.d\Phi(\omega)\,, \tag{4}$$

където $d\Phi(\omega)$ са комплексните амплитуди на хармоничните колебателни движения, на които се разлага случайната функция $\varepsilon(t)$.

Разпределението на амплитудите $d\Phi(\omega)$ е по случаен закон, при което се удовлетворява условието

$$M[d\Phi(\omega)] = 0\,. \tag{5}$$

От (4) и (5) следва, че плътността на вероятноста на ординатите $F(\varepsilon)$ на случайната функция $\varepsilon(t)$ може да зависи от времето като от параметър. Тогава, математическото очакване $\bar{\varepsilon}(t)$ на случайната функция $\varepsilon(t)$ ще бъде

$$\bar{\varepsilon}(t) = M[\varepsilon(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon.F(\varepsilon).d\varepsilon\,. \tag{6}$$

Видът на дясната част на (6) показва, че математическото очакване $\bar{\varepsilon}(t)$ може да бъде оценено експериментално чрез

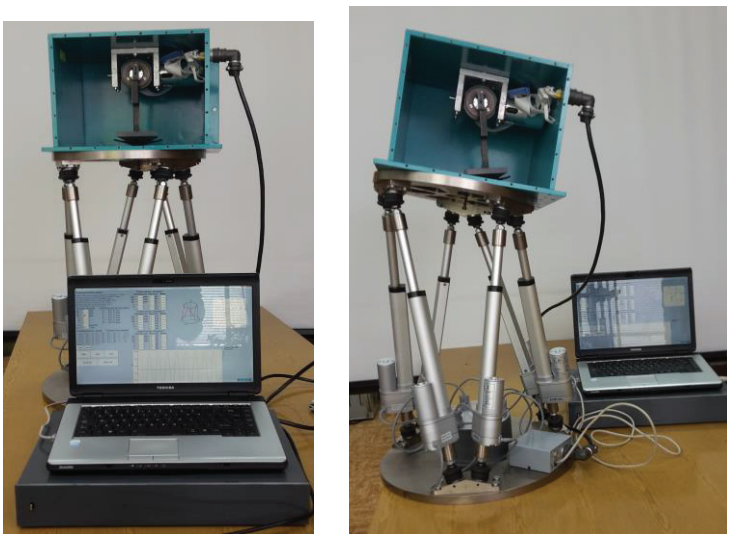
$$\tilde{\varepsilon} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \varepsilon(i.\Delta)\,. \tag{7}$$

В оценката (7) се използват краен брой ординати n, определени в дискретните точки $i.\Delta$, получаващи се чрез разделяне на целия интервал T на n равни части, всяка от които е с големина Δ. При което формула (7) може да бъде използвана с достатъчна точност в експерименталните изследвания за оценяване на систематичната съставляваща на грешката на измервателните системи (Karakoulidis, K. и др., 2016).

Характеристика на изпитателната апаратура

Характерна особеност на средствата, измерващи параметрите на движение на подвижните обекти, е че те работят в условия на динамични въздействия, обусловени от движението и ъгловите и линейните колебания на тези обекти около или заедно с центъра им на тежест (Nilsson, J-O. & I. Skog, 2016). Ето защо методите за изследване на динамичната точност на цитираните по-горе измервателни средства (корабен диферентомер) трябва да бъдат съобразени с характеристиките на величините, предизвикващи динамичните въздействия. В този случай инерционните въздействия, обусловени от клатенето на корабите, са основният източник за динамичната грешка на измервателните средства и системи, работещи на тези обекти.

Апаратурата е разработена във вид на хексапод с шест степени на свобода, което позволява да се възпроизвежда колебателното движение на кораба във вид, близък до реалните условия на експлоатация (Dichev, D. и др. 2016). За осигуряване на точността на изследванията е осъществено калибриране на апаратурата и е обезпечена метрологичната проследимост на единицата ú до еталона за дължина. Общият вид на апаратурата, заедно с изследвания диферентомер, е показан на фиг.1, а повече подробности за нея са представени в (Dichev, D. и др. 2016).



Фиг.1. Снимков материал на изпитателната апаратура и изследвания диферентомер

Методика за изследване на точностните характеристики

Методиката се изпълнява последователно за двата измервателни канала, съответно за определяне на бордовото клатене и крена и за определяне на килевото клатене и диферента. Измерванията във всяка една точка от честотния диапазон се извършват за пет последователни амплитуди на колебание на работната платформа на стенда. При изследване на канала, измерващ бордовото клатене и крена, работната платформа възпроизвежда хармонични ъглови колебания със следните амплитуди: $A_j^{\theta} = 5^{o}, 10^{o}, 15^{o}, 20^{o}, 25^{o}$. За килевото клатене стойностите на амплитудите са съответно: $A_j^{\psi} = 2^{o}, 4^{o}, 6^{o}, 8^{o}, 10^{o}$.

За всяка една от посочените амплитуди се регистрират L на брой реализации, получени за колебания на работната платформа за всяка една от последователните кръгови честоти ω_l. Първата работна честота е $\omega_1 = 0,4\ rad/s$, а всяка следваща честота се получава от $\omega_{l+1} = \omega_l + \Delta\omega$, където $\Delta\omega = 0,2\ rad/s$. Измерванията започват в момента от време $t_1 = 0$, в което работната платформа на стенда е хоризонтална. При задвижване на работната платформа на стенда с първата работна кръгова честота $\omega_2 = 0,2\ rad/s$ и най-малката амплитуда $A_j = A_{min}$ се определят разликите $\varepsilon_{l,i}^{j}$ в последователните моменти от време t_i, като $t_{i+1} = t_i + \Delta t$, а $\Delta t=0,02s$, $i = 1,2,...,n$. Разликите $\varepsilon_{l,i}^{j}$ представляват абсолютните грешки, определени в моментите от време t_i, посредством

$$\varepsilon_{l,i}^{j} = y_{l,i}^{j} - y_{0_{l,i}}^{j}. \tag{8}$$

където $y_{l,i}^{j}$ е стойността, измерена от изследваната система, на ъгловата ордината в момента от време t_i, когато работната платформа извършва колебателно движение с амплитуда A_j, $j = 1,2,...,5$ и кръгова честота ω_l, $l=1,2,...,L$; $y_{0_{l,i}}^{j}$ - стойността на заданието, управляващо движението на работната платформа, в момента от време t_i с входни данни A_j и ω_l.

Реализацията l се счита за изпълнена когато броячът във временната област $i = i + 1$ достигне стойност, при която *i-ят* момент от време е $t_i > T_r$. Определянето на всички стойности на абсолютната грешка $\varepsilon_{l,i}^{j}$ в *l-та* реализация дава възможност да се изчисли средноаритметичната стойност на грешката

$$\tilde{\varepsilon}_l^{j} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{l,i}^{j}. \tag{9}$$

където n е броят на определените стойности на грешката $\varepsilon_{l,i}^{j}$ в *l-та* реализация.

Средноаритметичната стойност, изчислена чрез (9), представлява оценката на систематичната грешка на диферентомера при ъглови колебания на работната платформа около съответната координатна ос с кръгова честота ω_l и амплитуда A_j. Средно-квадратичното отклонение на грешката $\varepsilon_{l,i}^{j}$ в *l-та* реализация се изчислява по формулата

$$\tilde{\sigma}(\varepsilon_l^j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\varepsilon_{l,i}^{j} - \tilde{\varepsilon}_l^{\,j}\right)^2} \ . \tag{10}$$

Определят се средноквадратичните отклонения на оценките на систематичната грешка, като за целта се използва следната формула:

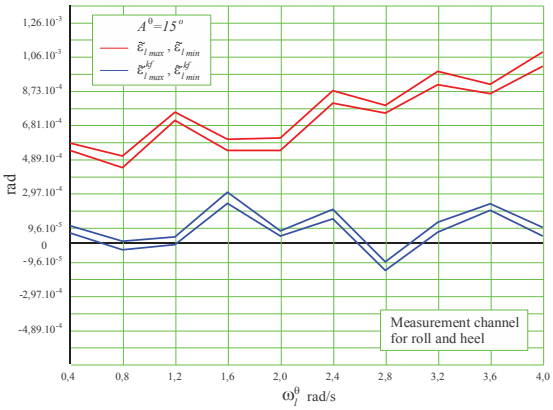
$$\sigma(\tilde{\varepsilon}_l^{\,j}) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \tilde{\sigma}(\varepsilon_l^j). \tag{11}$$

Границите на оценките на систематичните грешки, определени при движението на работната платформа с амплитуда A_j и кръгова честота ω_l, за доверителна вероятност $\alpha = 95\%$ и нормално разпределение могат да се изчислят чрез

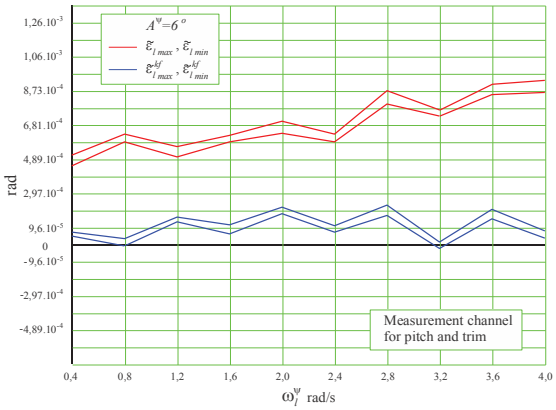
$$\tilde{\varepsilon}_{l\,max}^{\,j} = \tilde{\varepsilon}_l^{\,j} + 2.\sigma(\tilde{\varepsilon}_l^{\,j}) \ ; \qquad \tilde{\varepsilon}_{l\,min}^{\,j} = \tilde{\varepsilon}_l^{\,j} - 2.\sigma(\tilde{\varepsilon}_l^{\,j}). \tag{12}$$

Изследване и резултати

Разпределението на границите на систематичната грешка във функция на кръговата честота ω_l^{θ} (при възпроизвеждане на бордовото клатене) и ω_l^{ψ} (при възпроизвеждане на килевото клатене), с която работната платформа извършва ъглови колебателни движения, при изследване на двата измервателни канала са дадени на фигури 2 и 3.

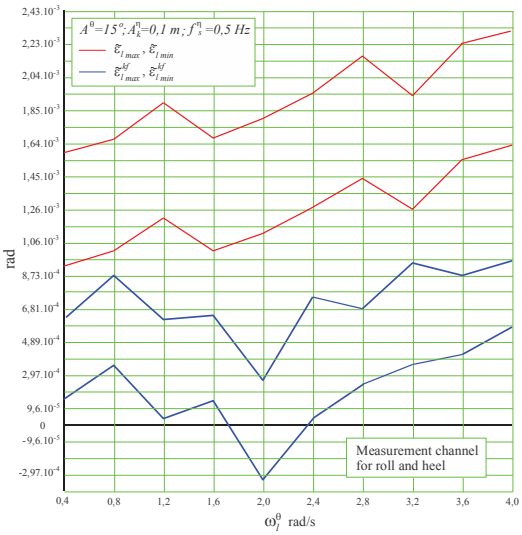


Фиг.2. Стойности на системат. грешка за борд. клатене и крена

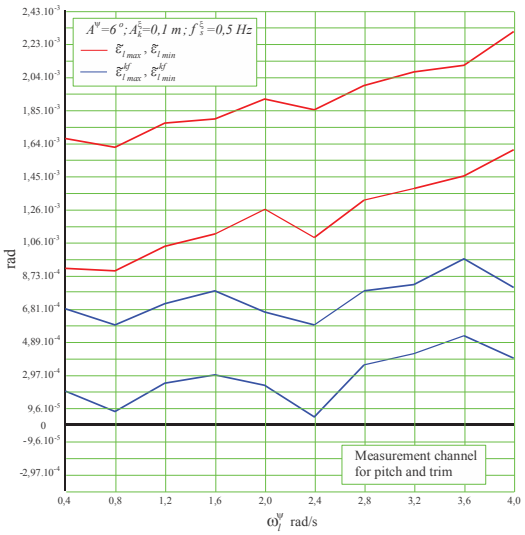


Фиг.3. Стойности на системат. грешка за кил. клатене и диферента

На фиг.2 са представени резултатите от изследването на точността на измервателния канал за бордовото клатене и крена при амплитуда на колебанията $A^{\theta}=15^{o}$ на работната платформа, а на фиг.3, съответно за канала на килевото клатене и диферента за амплитуда $A^{\psi}=6^{o}$. И на двете фигури са показани границите на изменение на систематичната грешка в двата режима на работа на системата, съответно - без включване на модула, обработващ измервателните сигнали в съответствие с алгоритъма на Калман ($\tilde{\varepsilon}_{l\,max}$ и $\tilde{\varepsilon}_{l\,min}$), и с включване на този модул ($\tilde{\varepsilon}_{l\,max}^{kf}$ и $\tilde{\varepsilon}_{l\,min}^{kf}$).



Фиг.4. Граници на доверителните интервали на случайната съставляваща за канала на борд. клатене и крена



Фиг.5. Граници на доверителните интервали на случайната съставляваща за канала на кил. клатене и диферента

Границите, които може да достигне грешката на изследваната измервателна система при *95%* доверителна вероятност, са представени на фигури 4 и 5. Резултатите от експерименталните изследвания показват, че максималните стойности на грешката от измерване при изключен модул с филтъра на Калман не надхвърлят *0,16°* за най-неблагоприятния случай на работа на измервателната система. При включване на модула към измервателната верига тази грешка намалява значително, като в условията на експерименталните изследвания не надвишава *0,07°*.

ИЗВОДИ

Разработената, реализирана и представена в настоящата работа изпитателна апратура за точностните характеристики притежава всички необходими свойства, позволяваща определянето и изследването на динамичната точност на уреди и системи за измерване на бордовото и килевото клатене, крена и диферента на кораби. Това има важно значение както при синтеза на средствата за измерване на посочените величини, така и при избора им за конкретния плавателен съд.

Съставената методика за определяне и изследване на точностните характеристики дава възможност за провеждане на метрологична проверка на възможно най-широкия спектър от величини, характеризиращи динамичната грешка, при средства и системи, измерващи параметри на плавателни обекти.

БЛАГОДАРНОСТИ

Тази работа беше подкрепена от проект ДФНИ Т02/9/12.12.2014 на Министерството на образованието и науката на Република България, както и от договор № 1705М към фонд "Университетски проекти за научни изследвания, финансирани от държавната субсидия".

REFERENCES

Dichev, D., Koev, H., Bakalova, T., Louda. P. (2016). A Measuring Method for Gyro-Free Determination of the Parameters of Moving Objects. *Metrology and Measurement Systems,* 23 (1), ISSN 0860-8229, 107-118.

Jiang, M., Luo, J., Jiang, D., Xiong, J., Song, H., Shen, J. (2016). A Cuckoo Search-Support Vector Machine Model for Predicting Dynamic Measurement Errors of Sensors. *IEEE Access*, vol. 4, ISSN 2169-3536, 5030-5037.

Karakoulidis, K., Fantidis, J. G., Potolias, C., Kogias, P., Bandekas., D. V. (2016). The

Temperature Measurement of a Single Phase Induction Motor under Different Conditions. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,* 11 (19), ISSN 1819-6608, 11495-11502.

Nilsson, J-O. & I. Skog. (2016). Inertial Sensor Arrays - A Literature Review. *24th European Navigation Conference, IEEE*, Finland, 2016, ISBN 978-147998915-7.