



## Uncertainty Estimation in Measurement of Ship’s Shaft Line Bearings Reaction by “Jack-Up Test” Method

Sevdalin VALCHEV, Christo PIROVSKY

Technical University of Varna, Bulgaria,  
e-mails: [sevdalin.valchev@tu-varna.bg](mailto:sevdalin.valchev@tu-varna.bg), [christo.pirovsky@tu-varna.bg](mailto:christo.pirovsky@tu-varna.bg)

### Abstract

This article describes the estimation of uncertainty in measurement of ship’s shaft line bearings load, using “jack-up test” method. The measurement results vary widely, and when estimating bearing load (shaft line alignment) an erroneous conclusion can be given, so the uncertainty needs to be assessed. The article contains an example of estimating the uncertainty of a specific measurement.

**Keywords:** uncertainty, bearing reaction, ship, shaft line

## Оценяване на неопределеността при измерване реакциите на лагерите на корабен валопровод по метода „крик тест“

Севдалин ВЪЛЧЕВ, Христо ПИРОВСКИ

### 1. Увод

Според съвременните изисквания на метрологията, докладването на резултата от измерване на физична величина е във вида  $\bar{X} \pm U$ , където  $\bar{X}$  е средната стойност от  $n$  кратните измервания на величината, а  $U$  – разширената неопределеност, количествена оценка за качеството на резултата и неговата надеждност. Тя отразява невъзможността за точното познаване на стойностите на измерваната величина [1].

Основното изискване на GUM [2] е използването на модел за оценка на неопределеността. Той трябва да съдържа всички величини, които имат значителен принос към неопределеността, свързана с резултата от изпитването. В практиката обикновено се определят най-значимите източници на неопределеност, които непосредствено влияят на качеството на резултата.

Експерименталното измерване на реакциите на лагери по метода „крик тест“ се извършва без необходимост на монтаж на динамометри и при напълно работоспособно състояние [3]. Поради тази причина този метод е широко използван при потвърждение на центровката на корабни валопроводи (разпределението на натоварванията по опорите). Често, резултатът от измерването варира при последователни измервания, но не винаги има възможност да се извършат множество последователни измервания, а в много случаи са от значение дори малки отклонения в натоварването. Ето защо е необходима оценка на неопределеността на резултата при измерване на лагерни реакции по метода „крик тест“.

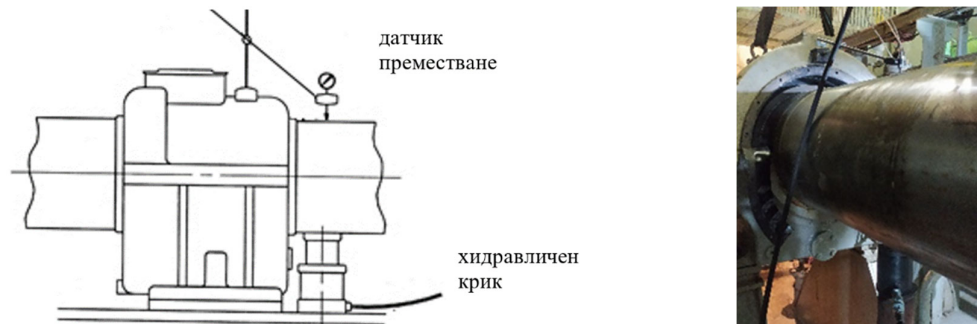
Настоящата публикация има за цел да представи практически пример за оценка на неопределеността при измерване натоварването на опорен лагер на корабен валопровод по метода „крик тест“, както и определяне на основните приноси към тази неопределеност.

## 2. Изчисляване на неопределеността на резултата при измерване реакцията на опорен лагер на корабен валопровод по метода „крик тест“

Експерименталното измерване на натоварването на лагерите по метода „крик тест“ е свързано с едновременно измерване на повдигането на вала в точка, в близост до изследвания лагер, и измерване на натоварването на хидравличния крик. Това натоварване се определя чрез измерване на налягането в крика [3].

Поради невъзможността крикът да бъде поставен в средата на лагера се използва поправъчен коефициент (коефициент на реакция)  $C_R$ .

Обект на изследването е опорният лагер на 56000 TDW кораб за насипни товари, фиг. 1.



Фигура 1. Лагер на междинния вал на 56000TDW кораб

Извършено е оценяване на неопределеността тип „А“ и тип „В“ на експерименталното определяне на натоварването на лагерите.

За оценка на неопределеността тип „А“ се извършва статистически анализ на серия от наблюдения при условия на повторяемост. Количествената стойност е стандартно отклонение.

При оценка на неопределеност тип „В“, средноквадратичната неопределеност се основава на: опит и общи познания за измерването; сертификати, справочни данни, спецификации на производителите.

### 2.1 Неопределеност тип „А“

Исходни данни за пресмятането са три последователни измервания на натоварването на опорния лагер на междинния вал на 56000TDW кораб за насипни товари. В табл. 1 са представени резултатите.

Стандартната неопределеност  $u(R)$  се определя като средноквадратично отклонение на  $n$  измервания – табл. 2.

Таблица 1. Резултати от измервания на натоварването на опорния лагер на междинния вал

Лагер	Състояние ГД	Измерване 1	Измерване 2	Измерване 3
R <sub>2</sub>	студено	22618	23581	22498

**Таблица 2. Определяне на стандартната неопределеност тип „А“ на измерване натоварването на опорния лагер на междинния вал**

Средноаритметична стойност: $\bar{R}_2, N$	Средноквадратична неопределеност: $u(R_{i2}) = h \cdot \sqrt{\frac{\sum(R_2 - \bar{R}_2)^2}{n(n-1)}}, N$ (1) коэффициент $h=2.3 [1]$	Разширена неопределеност: $U = k \cdot u(R_2), N$ при $k=2$ (2)
<b>22899</b>	<b>788.4</b>	<b>1576.6</b>
<b>Обявен резултат: <math>R_b = 22899 \pm 1576.6 N</math></b>		

## 2.2 Неопределеност тип „В“

Системата за измерване натоварването на лагерите на корабни валопроводи по метода „крик тест“ на научно-производствена лаборатория „Виброконтрол и диагностика на машини и съоръжения“ включва следните елементи:

- вихротоков преобразувател на преместване – 8 mm Proximitor 3300 Bentley Nevada;
- преобразувател на налягане – Pressure Transmitter A-10 WiKa;
- аналогово-цифров преобразувател (АЦП) на напрежение – National Instruments NI9215.

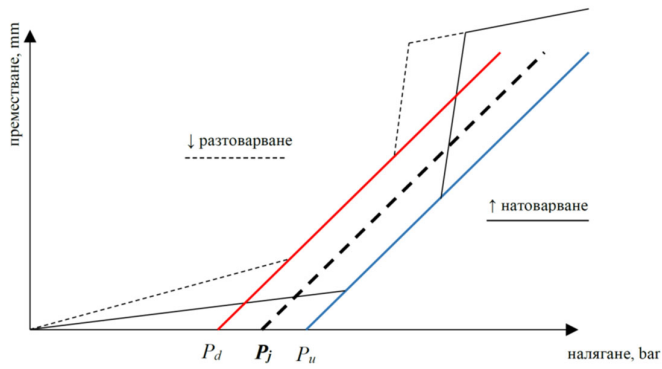
В табл. 3 са представени характеристиките на тези елементи, дадени от производителя или от свидетелства за калибриране.

**Таблица 3. Характеристики на преобразувателите и АЦП на системата за измерване натоварването на лагерите**

Преместване	Налягане	АЦП
Тип: 8mm Proximitor Bently Nevada P/N 330100-90-00	Тип: А—10 Wika P#12725102 S#F00WIK01	Тип: NI9215 /24 bit National Instruments
Захранване: 23÷26 V DC Линеен диапазон: 0.25÷1.75mm Чувствителност: 7.87V/mm Линейност: < ±0.06 mm Честотен диапазон: 0÷10000 Hz Температурен диапазон: -35÷+85°C Влажност: до 100%	Изход: 10V (250 bar) – 25 bar/V Обхват: 0÷250bar Захранване: 14÷30V DC Време на реакция: 4 ms Точност: ±1 % (Линейност – 0.5%) Температура: 0÷80°C	Обхват: 10V – праг на чувствителност (10000 mV/2 <sup>16</sup> ) = 0.152 mV  Точност: 0.02% от усилване (gain), 0.014% от нулата (offset). (калибрирана при 25±5°C)

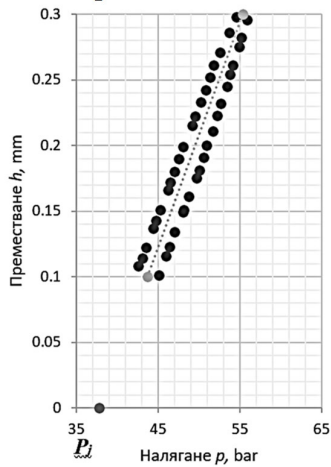
Измерването на реакциите на лагера чрез „крик тест“ метода е свързано с определяне на преместването на вала в точката на прилагане на външна сила с помощта на хидравличен крик. Поради настъпващия хистерезис измерването се извършва както при повдигане на вала, така и при спускане. Определя се средно натоварване в крика  $P_j = \frac{P_u + P_d}{2}$ , фиг. 2.

Получените стойности за налягане и преместване при повдигане и спускане на вала  $p_i$  и  $h_i$  определят две прави в равнината, а търсените налягания  $P_u$  и  $P_d$  ще представляват отрезки от тези прави с числова ос на налягането, фиг. 2.



Фигура 2. Хистерезисна крива „крик тест“

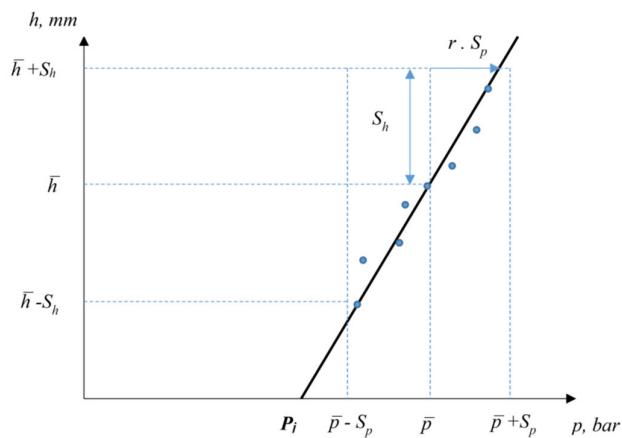
За опростяване на процедурата, стойностите на  $p$  и  $h$  на правите на повдигане и спускане се обединяват, като по този начин стойностите апроксимират една права, определяща търсеното налягане в крика  $P_j$  – фиг. 3.



Средноаритметични стойности на налягането и преместването	$\bar{p}$ , bar	49.44
	$\bar{h}$ , mm	0.198
Средноквадратични стойности на налягането и преместването	$S_p$ , bar	3.66
	$S_h$ , mm	0.058
Коеф. на корелация	$r$	0.93102
Ъглов коефициент на правата	$k$	58.51
Натоварване в крика	$P_j$ , bar	37.85

Измерено натоварване на лагера	$R_b^{num}$ , N	23581
--------------------------------	-----------------	-------

Фигура 3. Резултати от измерването на реакцията на лагера



Фигура 4. Аналитично определяне на налягането  $P_j$

За аналитичното определяне на търсеното налягане  $P_j$  може да бъде използван следният подход: нека  $p_i$  и  $h_i$  са съответно измерените стойности на налягането и преместването при повдигане и сваляне на вала, фиг. 4.

Тогава за коефициентът на корелация на входните величини при  $n$ -брой измервания се получава:

$$r(p, h) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{h_i - \bar{h}}{S_h} \right) \cdot \left( \frac{p_i - \bar{p}}{S_p} \right), \quad (3)$$

където:  $\bar{p}$  и  $\bar{h}$  са средноаритметични стойности на налягането и преместването;  $S_p$  и  $S_h$  са средноквадратични отклонения.

Уравнението на права апроксимираща получените стойности от измерването ще има вида:

$$P(h) = k \cdot h + P_j, \quad (4)$$

където  $k$  е ъглов коефициент на правата:

$$k = r \cdot \frac{S_p}{S_h}. \quad (5)$$

Тогава за търсеното налягане  $P_j$  като изходна величина на входните величини  $p$  и  $h$  ще се получи моделната функция:

$$P_j = \bar{p} - k \cdot \bar{h} = \bar{p} - \left( r \cdot \frac{S_p}{S_h} \right) \cdot \bar{h}. \quad (6)$$

Коефициентите на чувствителност се определят като частни производни на моделната функция:

$$c_p = 1; c_h = -r \cdot \frac{S_p}{S_h}.$$

Определя се „средно“ натоварване в крика, при което се получава отделянето на вала от лагера:

$$R_j = P_j \cdot A_j \cdot 10, N, \quad (7)$$

където:  $P_j$  – налягане в хидравличния крик при отделяне на вала от лагера;  $A_j$  – площ на крика.

Поради невъзможността крика да бъде поставен в средата на лагера се използва поправъчен коефициент (коефициент на реакция)  $C_R$ , който е обект на допълнително пресмятане, при липсата му в документацията на валопровода. След умножение на натоварването на крика  $R_j$  с този коефициент се получава натоварването на лагера  $R_b$ :

$$R_b = C_R \cdot R_j, N \quad (8)$$

Следователно натоварването на лагера е във функция от измерваните налягания и премествания  $R_b = f(p, h, C_R)$ , където  $p$  и  $h$  са измененията на налягането в хидравличния крик и преместването (повдигането) на вала в сечението над крика. При изследването се допуска, че коефициентът  $C_R$  е зададен, както и неговата неопределеност:

- коефициент на реакция на лагер No2:  $C_R = 0.9832$ ;
- комбинирана неопределеност на  $C_R$ :  $u_c(C_R^{No2}) = 0.0057$ .

Неопределеността на експерименталното измерване се свежда до определяне на неопределеността на измерване на наляганията и преместванията.

Поради липса на сведения за законите за разпределение на систематичните грешки от паспортните характеристики на елементите на измервателната система, съгласно [2], се приема равномерно (правоъгълно) разпределение, стандартната неопределеност се определя:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

където  $a$  е указаният интервал без да е упомената статистическата сигурност.

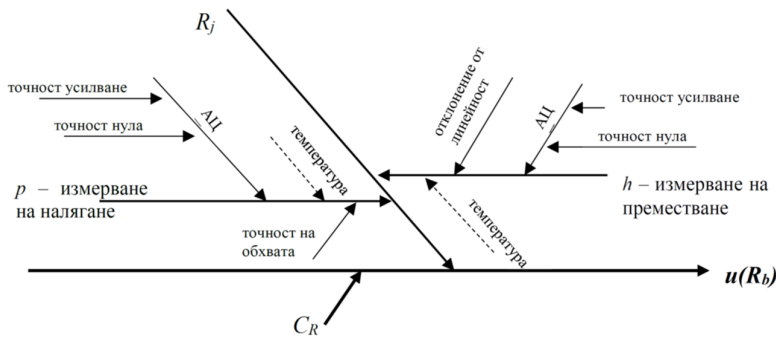
За стандартната неопределеност на  $P_j$  на корелирани величини се използва [1]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u^2(x_i) + \sum_{i=1}^n c_i \cdot c_k \cdot u(x_i) \cdot u(x_k) \cdot r_{ik}}, \quad (10)$$

Оценката на неопределеността  $u_c(R_b)$  на измерване на натоварването на лагер по метода „крик тест“ съдържа две съставляващи: стандартна неопределеност на налягането (натоварването върху крика)  $u(P_j)$  и стандартната неопределеност на коефициента на реакция –  $u(C_R)$ . Тъй като функцията съдържа само умножение, се използва:

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{u(x_i)}{x_i}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u(x_2)}{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{u(x_n)}{x_n}\right)^2}. \quad (11)$$

С цел идентифициране на възможните източници на неопределеност се създава списък на тези, които внасят неопределеност в крайния резултат. За илюстриране на източниците на неопределеност е създадена графична структура с дървовидна форма (причинно-следствена диаграма) [4] – фиг. 5.



Фигура 5. Причинно-следствена диаграма за идентифициране на източниците на неопределеност при експериментално измерване на натоварването на лагерите по метода „крик тест“

Таблица 4. „Бюджет“ на неопределеността на измерване на натоварването на лагера на междинния вал по метода „крик тест“

Съставляващи	Означение	Тип оценка	Тип разпределение	Коефициент на разпределението	Брой измервания	Коефициент на чувствителност	Мерна единица	Средноквадратична неопределеност
Измерване на налягане	$u(p')$	V	правоъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	bar	1.44
Измерване на преместване	$u(h')$	V	правоъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	mm	0.0346
Измерване на ел. напрежение	$u(p_{\text{МШ}})$	V	правоъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	bar	0.0173
	$u(h_{\text{МШ}})$	V	правоъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	mm	0.0000882
Измерване на преместване (измервателен канал)	$u(p)$		$u(p) = \sqrt{u^2(p') + u^2(p_{\text{МШ}})}$			$c_p = 1$	bar	1.44
Измерване на преместване (измервателен канал)	$u(h)$		$u(h) = \sqrt{u^2(h') + u^2(h_{\text{МШ}})}$			$c_h = -r \cdot \frac{S_p}{S_h} = -58.75$	mm	0.0347
Натоварване на крика	$u(P_j)$		$u(P_j) = \sqrt{c_p^2 \cdot u^2(p) + c_h^2 \cdot u^2(h) + 2 \cdot c_p \cdot c_h \cdot u(p) \cdot u(h) \cdot r(p, h)}$				bar	3.47
<b>Комбинирана неопределеност <math>u_c(R_b)</math></b>							N	<b>2166.2</b>
<b>Разширена неопределеност <math>U=2 \cdot u_c</math>, при <math>k=2</math></b>							N	<b><math>\pm 4414.2N</math></b>
<b>Обявен резултат: <math>R_b = 23581 \pm 4414 N</math></b>								

Влиянието на температурата на околната среда върху характеристиките на преобразувателите не е отчетено. Обикновено измерванията се провеждат при температура в машинно отделение близка до температурата на калибровка ( $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ ).

В табл. 4 е представен „бюджетът“ на неопределеността на измерване натоварването на лагерите по метода „крик тест“.

### **3. Изводи**

В публикацията е извършена оценка на неопределеността на измерване натоварването на опорния лагер на междинния вал на 56000TDW кораб. Представени са два подхода за оценката – „оценяване тип А“ чрез статистически анализ на серия от последователни измервания и „оценка тип В“, основана на преценка на наличната информация на възможните изменения на входните величини. При нея подробно са анализирани характеристиките на използваните преобразуватели като елементи на измервателната система. Определени са техните стандартни неопределености.

В резултат на проведеното изследване, при измерването на реакцията на опорния лагер на междинния вал е установена разширена неопределеност в граници  $\pm 20\%$  от реакцията на лагера.

#### ***Благодарности***

Екипът, провел научноизследователската работа по представената публикация, изказва своята благодарност за финансовата подкрепа осигурена по проект „Инфраструктура за устойчиво развитие в областта на морските изследвания“, обвързана и с участието на Р. България в Европейската инфраструктура Euro-Argo (МАСРИ/MASRI)“. <http://masri.io-bas.bg/>

#### **Литература**

1. Радев Хр., Метрология и измервателна техника, Том 1, Софттрейд, 2008, ISBN 978-954-334-077-4
2. JCGM 100:2008 – Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections), Suvres, France, 2008
3. ClassNK, Guidelines on shafting alignment, 2006
4. Умарова Н. Н., Мовчан Н. И., Горюнова С. М., Смердова С. Г., Оценка неопределености аналитических измерений: учебно-методическое пособие, КГТУ, Казань, 2010, ISBN 978-5-7882-0851-0