Изследване на метод за комплексен двупрофилен контрол без еталонно зъбно колело

Младен Петров, Бранко Сотиров

Research on methods for complex dual-flank gear test without reference master gear.
The article presents the results of planned engineering experiment to find the influence of certain geometrical parameters and accuracy of the gears on the error of measurement of a new method for integrated control using dual-flank gear test. The aim of the authors was to determine the conditions under which the test data using the three wheels, proposed by authors, can be valid.
Keywords: *- Metrology, gears, complex dual-flank gear test, mathematical modeling.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Методите за планиране на експеримента са мощен подход за подобряване на процесите. За да бъде използван този подход е необходимо да има предварително ясна идея за целите на експеримента, точно какви фактори ще бъдат изучавани, как ще се проведе експеримента и как ще бъдат анализирани данните

Успешният експеримент изисква знания за важните фактори, обхватите, през които факторите трябва да варират, подходящия брой на използваните нива и подходящи единици за измерването на тези променливи величини. Изборът на подходящи фактори и нива на промяна и на компоновката на експерименталната установка е направен въз основа на предпроектните проучвания представени в [1], на теоретичните изследвания, представени в [2] и на изводите от проведен предварителен симулационен експеримент, представен в [3].

Задачата на провеждането на експеримента е да се установи, кои фактори, свързани с естеството на геометрията на зъбните колела, влияят силно върху грешката на измерване и по този начин да се въведат ограничения за използването на метода и респективно, ако избраните фактори не влияят върху грешката на измерване – да се докаже неговата работоспособност.

Изследваният комплексен метод за двупрофилен контрол се основава на компютъризирано класическо двупрофилно измерване без използване на еталонно зъбно колело на три произволно взети измервани зъбни колела с еднакъв брой зъби. Когато двойка реални зъбни колела с едни и същи геометрични показатели се зацепят двупрофилно, т.е. безхлабинно, то грешките им в радиално направление се сумират и променят тяхното измервателно междуцентрово разстояние (ИМР). Тази промяна се отчита за определена ъглова стъпка и в резултат на измерването на достатъчен брой промени на ИМР, се получава сумарен вектор (амплитуда на първия хармоник) [1], [2], [3]. Контролираните зъбни колела образуват три измервателни двойки 1-2; 1-3, 2-3, съставени само от измервани зъбни колела. Извършват се трите измервания върху стандартен междуцентромер при двупрофилно зацепване при едни и същи начални положения и посоки на въртене на всяко зъбно колело, т.е. при фиксирани начални фази на колебанията. В резултат на това се получават собствените кинематични грешки на всяко измервано зъбно колело след решаването на векторните уравнения [1]:

$$\overrightarrow{A1_1} = \frac{1}{2}.(\overrightarrow{A12_1} + \overrightarrow{A13_1} - \overrightarrow{A23_1})$$
$$\overrightarrow{A2_1} = \frac{1}{2}.(\overrightarrow{A12_1} + \overrightarrow{A23_1} - \overrightarrow{A13_1})$$
$$\overrightarrow{A3_1} = \frac{1}{2}.(\overrightarrow{A13_1} + \overrightarrow{A23_1} - \overrightarrow{A12_1})$$

Избор на фактори

Факторите които са избрани за необходимия експеримент са: модул на зъбното колело, коефициент на корекция, ъгъл на профила на зъба и радиално

биене. Тези четири фактора са добре познати от комплексната двупрофилна проверка и е доказано, че са най–значимите [2]. При характеризирането на процеса е най–удобно да се подържат по малък брой факторни нива затова всеки от избраните е с по две.

Избор на план на експеримента

Факторните планирани експерименти от типа $2^к$ са широко разпространени в практиката, където е необходимо да се получи общия ефект от факторите върху резултата. То осигурява най-малкия брой комбинации на нивата, при които к - фактора могат да бъдат проучени при пълно комбиниране на факторите. Тъй като съществуват само две нива за всеки фактор, може да се допусне, че резултата е приблизително линеен през обхвата на избраните нива на фактора. В края на краищата, задачата на провеждането на експеримента е да се установи, кои фактори, свързани с естеството на геометрията на зъбните колела, влияят силно върху грешката на измерване и по този начин да се въведат ограничения за използването на метода и респективно, ако избраните фактори не влияят върху грешката – да се докаже неговата универсалност.

Код	Наименование	Дименсия	Равнища на факторите	
			1 Ниво	2 Ниво
A	Модул на ЗК	mm	4,5	3
B	Коефициент на корекция	mm	1 (1.1)	0
C	Грешка на Профилен ъгъл (20deg)	min	-30 min	0
D	Радиално биене		Голямо	Малко

Схема на опитната установка

Едно от основните предимства на изследвания метод за комплексен контрол на цилиндрични зъбни колела с прави зъби без използване на еталонно зъбни колело е, че той може да се използва при наличие на механична конструкция на обикновен класически междуцентромер, след съответна доработка. За провеждане на експеримента е избран универсален уред с електромеханично задвижване МС-400, като са направени някои доработки, илюстрирани на Фиг.1. Стендът се състои от масивна основа, върху която са разположени две гладки шейни, по които се движат две каретки лява и дясна. Дясната каретка се предвижва по хоризонтално направление с винтов механизъм и има възможност за се застопорява при измерване. В разположените на нея центри може да се постави дорник с различна дължина. Лявата каретка извършва възвратно - постъпателно движение в следствие промяната на ИМР при измерване. Измервателното усилие се задава и подържа постоянно в тесни граници с плоска пружина. С друг винтов механизъм се осъществява придвижване, така че да може да се регулира позицията на задвижващото зъбното колело вертикално. Следенето на ъгловото завъртане на водимото зъбно колело, установено в дорника на подвижната каретка и задвижвано

Фиг. 1.

от бавнооборотен реверсивен мотор-редуктор (1 min^{-1}), се осъществява от кръгов фоторастеров преобразувател, свързан със съединител към дорника, които предава въртящия момент. Сигналът, съответстващ на линейните отклонения в радиално направление на ИМР при двупрофилно зацепени зъбни колела се отчита от линеен фоторастеров преобразувател.

За управление на провеждане на измерването се използва програмната система LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), която е мощен и гъвкав инструмент за автоматизация на инженерни изследвания. Графичният подход позволява на инженери, които не са програмисти, да създават свои приложения без да имат познания по други програмни езици. Обработването на данните от измерването е извършено с Програмната система MathCAD, която е една от най-съвременните гъвкави системи за пресмятане на математични алгоритми.

Експерименталните зъбни колела (фиг. 2) са изработени съвместно в катедри ТММРМ и «Машинознание и машинни елементи» при Русенския университет „Ангел Кънчев". За нуждите на експеримента са обрботени няколко групи зъбни колела които умишлено имат направени грешки, отговарящи на нивата факторите Така като е известна грешката, може лесно да се установи дали измерването е коректно. От проектираните колела в измерването се използват дванадесет групи с по три зъбни колела като едните са без корекция, а другите с корекция x=+1 или x=+1,1, броят на зъбите им е z=30 или z=48, а модулът им m=4.5 или m=3. За да се промени умишлено радиалното им биене е използва втулка с ексцентрицитет. Така при завъртане на отвора на зъбното колело спрямо втулката се получават изкуствено още 4 групи зъбни колела, със симулирано радиално биене или общия брои групи става шестнадесет.

Фиг. 2. Еталонни и експериментални зъбни колела

При провеждането на експеримента са използвани два броя еталонни дорници, с минимално радиално биене до 2μм. Едните са класическо изпълнение на цилиндричен дорник, а при другите радиалната хлабина се компенсира чрез деформиране на сцепена втулка при осево преместване на вътрешен конус по външна конусна повърхнина.

За провеждането на експеримента са избрани два вида еталонни зъбни колела с различни показатели. Първото е със модул 4,5мм., брой на зъбите z=30 и ъгъл на профила на зъба α=20 . Второто е със модул 3мм., брой на зъбите z=48 и ъгъл на профила на зъба α=20. Целта на еталонните зъбни колела е да се измерят реалните параметри на проектираните, специално за експеримента зъбни колела и резултатите от тях да се използват като база за сравнение с резултатите от комплексната двупрофилна проверка по метода на трите колела.

Последователност на работа с опитната установка.

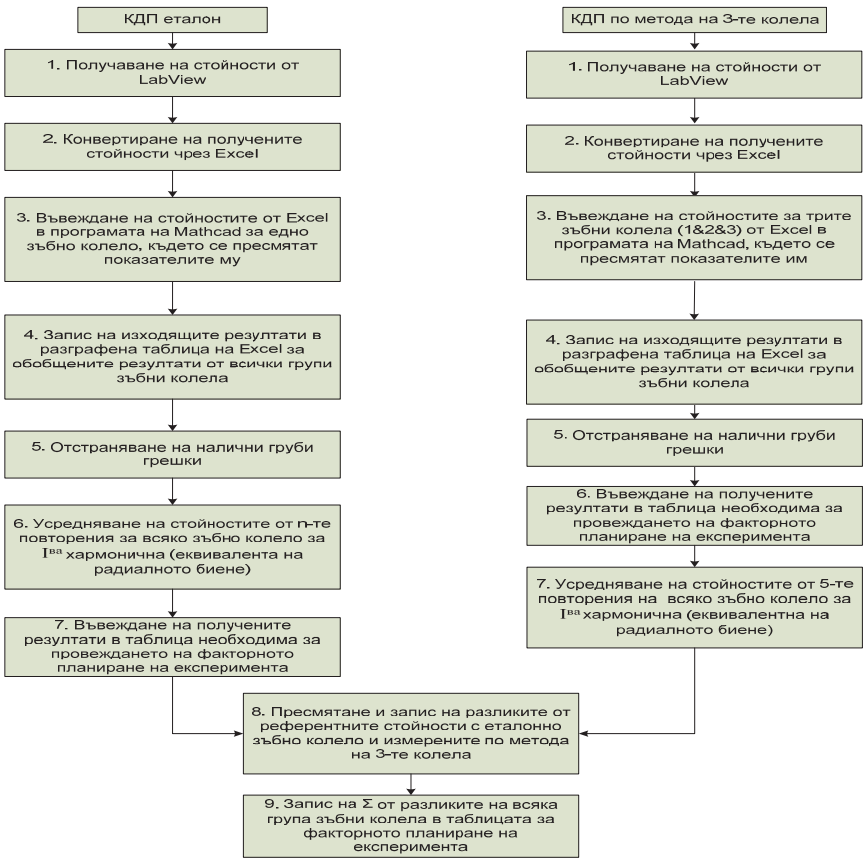
След изборът на фактори и промяна на техните нива и изборът на план на експеримент е проведен експеримент в последователност, и илюстрирана на фиг.3. Сравнява се резултата, получен при измерване на двойната амплитуда на първия

хармоник, еквивалентен на радиалното биене на зъбното колело получено по метода на трите колела и същото, получено при измерване по класическия метод за КДП. Целта е тази разлика да е минимална, т.е. да се намери тази комбинация от доказано действащи фактори, при които предлаганият метод да може да замени класическия метод за КДП. Данните от експеримента са обработени с програма разработена на EXCEL по методика, която е илюстрирана на фиг.4.

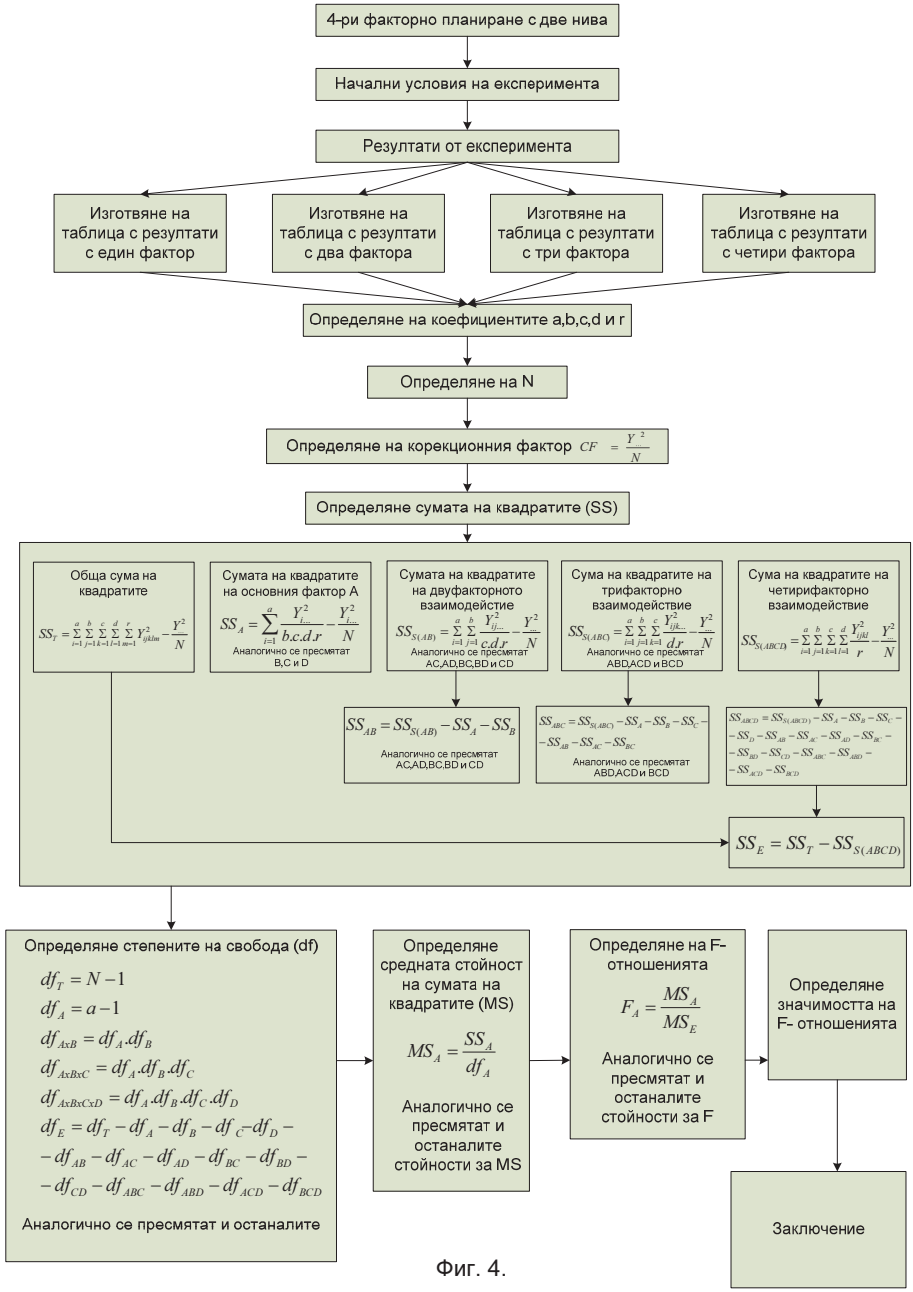
Извършено е петкратно повторение на всяка комбинация от действието на факторите, т.е извършени са 2^4 =16 опита х 5 повторения – 80 измервания. Повторенията, освен че са изискуеми по плана на експеримента, са направени с цел да се открият аномални резултати при измерването, което е извършено според методиката представена в БДС14653-77, чрез разработена програма на EXCEL. Опитите, при които са получени аномални резултати са повторени отново.

Съгласно методиката описана в [4] и илюстрирана на фиг.4., е видно, че е изследвано влиянието освен на единичното (самостоятелното) действие и комбинацията от два, три и четири фактора.

Алгоритъм за обработване на резултатите от измерването по метода на КДП с еталонно зъбно колело и по метода на 3-те зъбни колела

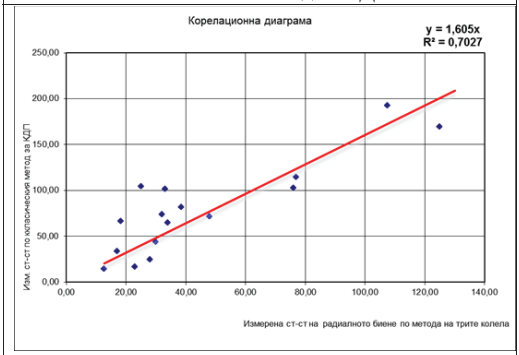


Фиг. 3.

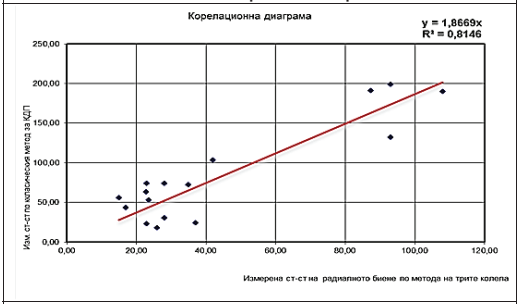

4-ри факторно планиране с две нива
Начални условия на експеримента
Резултати от експеримента
Изготвяне на таблица с резултати с един фактор
Изготвяне на таблица с резултати с два фактора
Изготвяне на таблица с резултати с три фактора
Изготвяне на таблица с резултати с четири фактора
Определяне на коефициентите a,b,c,d и r
Определяне на N
Определяне на корекционния фактор $CF = \frac{Y^2}{N}$
Определяне сумата на квадратите (SS)
Обща сума на квадратите
$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{d}\sum_{m=1}^{r} Y^2_{ijklm} - \frac{Y^2}{N}$
Сумата на квадратите на основния фактор A
$SS_A = \sum_{i=1}^{a} \frac{Y^2_{i...}}{b.c.d.r} - \frac{Y^2_{i...}}{N}$
Аналогично се пресмятат B,C и D
Сумата на квадратите на двуфакторното взаимодействие
$SS_{S(AB)} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} \frac{Y^2_{ij...}}{c.d.r} - \frac{Y^2}{N}$
Аналогично се пресмятат AC,AD,BC,BD и CD
Сума на квадратите на трифакторно взаимодействие
$SS_{S(ABC)} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} \frac{Y^2_{ijk..}}{d.r} - \frac{Y^2}{N}$
Аналогично се пресмятат ABD,ACD и BCD
Сума на квадратите на четирифакторно взаимодействие
$SS_{S(ABCD)} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{d} \frac{Y^2_{ijkl}}{r} - \frac{Y^2}{N}$
$SS_{AB} = SS_{S(AB)} - SS_A - SS_B$
Аналогично се пресмятат AC,AD,BC,BD и CD
$SS_{ABC} = SS_{S(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$
Аналогично се пресмятат ABD,ACD и BCD
$SS_{ABCD} = SS_{S(ABCD)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{AD} - SS_{BC} - SS_{BD} - SS_{CD} - SS_{ABC} - SS_{ABD} - SS_{ACD} - SS_{BCD}$
$SS_E = SS_T - SS_{S(ABCD)}$
Определяне степените на свобода (df)
$df_T = N - 1$
$df_A = a - 1$
$df_{AxB} = df_A.df_B$
$df_{AxBxC} = df_A.df_B.df_C$
$df_{AxBxCxD} = df_A.df_B.df_C.df_D$
$df_E = df_T - df_A - df_B - df_C - df_D -$
$- df_{AB} - df_{AC} - df_{AD} - df_{BC} - df_{BD} -$
$- df_{CD} - df_{ABC} - df_{ABD} - df_{ACD} - df_{BCD}$
Аналогично се пресмятат и останалите
Определяне средната стойност на сумата на квадратите (MS)
$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$
Аналогично се пресмятат и останалите стойности за MS
Определяне на F-отношенията
$F_A = \frac{MS_A}{MS_E}$
Аналогично се пресмятат и останалите стойности за F
Определяне значимостта на F- отношенията
Заключение

Фиг. 4.

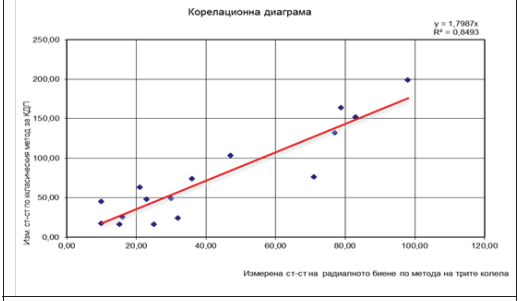
Взаимовръзка между метода по трите колела и класическия метод за КДП



Фиг. 5.а - първо измерване



Фиг. 5.в - второ измерване



Фиг. 5.с - трето измерване

Съгласно методиката, позната като ANOBA (дисперсионен анализ), доказването на значимостта на влиянието на всеки от факторите се извършва с така наречениият F-test, при който се търси изпълнение на неравенството $F > F_{\beta,k1,k2}$, където $F_{\beta, k1,k2}$ е таблична стойност на критерия за ниво на значимост β=95% и степени на свобода k1 и k2, определени спрямо зависимостите дадени във фиг.4., а $F = \frac{MS_F}{MS_E}$, като $MS_F = \frac{SS_F}{(a-1)}$, $MS_E = \frac{SS_E}{a(r-1)}$, където SS_F е сума на квадратите на стойностите на резултата, дължащ се на действието на управляемите, чрез промяна на нивата, фактори (познат и с терминът „сигнал"), и SS_E е сума на квадратите на стойностите на резултата, дължащ се на действието на случайно действащи неуправляеми фактори, характерни за всеки процес, (познат и с терминът „шум").

Уравнение $SS_T = SS_F + SS_E$ показва, че общата променливост в данните оценена чрез общата сума на квадратите SS_T, може да бъде разделена на сума на квадратите на разликите между средноаритметичните стойности на факторното ниво и главната средноаритметична стойност и сума на квадратите на разликите на наблюденията в специфичното факторно ниво и средноаритметичната стойност на факторното ниво. Разликите между наблюдаваните средноаритметични стойности на факторното ниво и сумарната средноаритметична стойност ($\bar{Y} - \bar{Y}_i$) оценява разликите между факторните нива, докато разликата между наблюденията във факторното ниво ($Y_{ij} - \bar{Y}_i$) и средната стойност на факторното ниво може да се дължи само на случайна грешка. Ако SS_F е голяма, то това се дължи на разлика между средноаритметичната стойност при различни факторни нива. Сравнявайки големината SS_F и SS_E може да се види каква част от променливостта се дължи на „сигнала" и каква част „шума" Това сравнение се улеснява, ако първо се претегли влиянието на частното на сумите на квадратите и степените им на свобода. Съществуват $N=a.r$ общ брой наблюдения, така че SS_T има $N - 1$ степени на свобода. Съществуват a факторни нива, така че SS_F има $(a - 1)$ степени на свобода. Накрая в рамките на всяко факторно ниво съществуват **r**

копия, осигуряващи **(r–1)** степени на свобода, чрез които може да се оцени експерименталната грешка. Тъй като съществуват **a** факторни нива, то за грешката има **a(r -1) = ar - a = N - a** степени на свобода.

ИЗВОДИ

1. От проведения експеримент се установи, че изследваният метод, наречен „методът на трите колела" за КДП е практически приложим. Видно от фиг. 5. е, че съществува силно изразена връзка между измерените стойности на грешките действащи в радиално направление при двата метода.

2. Експерименталното изследване на работоспособността и точността на метода на трите зъбни колела показа, че метода е работоспособен и може с успех да бъде прилаган за контрол на цилиндрични зъбни колела. Избраните фактори са статистически незначими и може да се приеме, че не оказват влияние върху резултатите получени и при класическия метод за КДП и метода на трите колела. Най–съществено влияние върху точността на измерване оказва изследваният фактор грешка на профилният ъгъл на контролираното зъбно колело. Методът на трите колела е особено чувствителен към съвместното влияние на всички изследвани фактори, което на практика означава едновременно наличие на интерференция при двупрофилно зацепване, разсейване на коефициента на припокриване, грешка на профилният ъгъл и голямо разсейване на радиалното биене на зъбният венец (геометричен ексцентрицитет).

3. Производителността на метода не отстъпва на класическия метод за КДП, не изисква специални умения (при наличие на съответния софтуер) и може успешно да бъде прилаган с класическите междуцентромери.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ПЕТРОВ Мл. , Бр. СОТИРОВ, Цв. КОРИЙКОВ, Методът за комплексна двупрофилна проверка - състояние и перспективи , International Conferencegeneral Machine Design, October 15-th – 16-th , 2009 , University of Ruse

[2] ПЕТРОВ Мл. Т. Станчев , Грешка на оценката на амплитудата и фазовият ъгъл на хармониките при метод за комплексен двупрофилен контрол на зъбни колела без еталонно колело, Научни трудове на РУ - 2011, том50, серия2

[3] ПЕТРОВ Мл., Изследване чрез симулационен експеримент на метод за комплексен двупрофилен контрол без еталонно зъбно колело, Научни трудове на РУ - 2011, том50, серия2

[4] ИВАНОВ ИВ., ИЛ. ЖЕЛЕЗАРОВ, Управление на качеството, част 1 и 2, Университетско из-во "В.Априлов", Габрово,1999г.

[5] МЕТРОЛОГИЯ И ИЗМЕРВАТЕЛНА ТЕХНИКА: книга-справочник в три тома. Том 2,под общ. ред. на проф. д.т.н. Хр. Радев, София: Софтрейд, 2010. 987 с., ISBN 978-954-334-077-4;

[6] МИТКОВ А. Л., Д. П. МИНКОВ, Статистически методи за изследване и оптимизиране на селскостопанска техника, I и II част, Земиздат, Сф., 1993.

За контакти:

Доц. д-р Бранко Душков Сотиров и Младен Илиев Петров Катедра „ТММРМ" при факултет „Машиннотехнологичен" на Русенски университет „Ангел Кънчев". www.uni.ruse.bg, mpetrov@ru.acad.bg bsotirov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран