

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-15-0295**

Pokročilé štatistické a výpočtové metódy pre meranie a metrologiu

Zodpovedný riešiteľ **doc. RNDr. Viktor Witkovský, CSc.**

Príjemca **Ústav merania SAV**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

1. Ústav merania SAV
2. Matematický ústav SAV
3. Strojnícka fakulta STU v Bratislave
4. Slovenský metrologický ústav

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

-

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo užitočné vzory, ktoré sú výsledkami projektu

-

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Za najvýznamnejšie výstupy za celú dobu riešenia projektu, ktoré dobre reprezentujú spektrum dosiahnutých výsledkov a reflektujú stanovené ciele projektu, považujeme tieto monografie a vedecké články:

1. DOVICA, M. – KELEMENOVÁ, T. – PALENČÁR, J. Bezdotykové metódy merania geometrických veličín. Košice Technická univerzita v Košiciach, 2020.
2. PALENČÁR, R. – WIMMER, G. - PALENČÁR, J. – WITKOVSKÝ, V. Navrhovanie a vyhodnocovanie meraní. Bratislava, Nakladateľstvo STU. 2021. V tlači.
3. WITKOVSKÝ, V. - WIMMER, G. - ĎURIŠOVÁ, Z. - ĎURIŠ, S. - PALENČÁR, R.: Brief overview of methods for measurement uncertainty analysis: GUM uncertainty framework, Monte Carlo method, characteristic function approach. In: MEASUREMENT 2017, Proceedings of the 11th International Conference on Measurement. Smolenice, Slovakia, 2017, 35-38.
4. RÁBOŇOVÁ, P. - WIMMER, G.: Confidence region for calibration function coefficients. Measurement Science Review 18(6), 2018, 227-235.
5. CHVOSTEKOVÁ, M.: Multiple use confidence intervals for a univariate statistical calibration. Measurement Science Review 19(6), 2019, 264-270.
6. KRAKOVSKÁ, A.: Correlation dimension detects causal links in coupled dynamical systems. Entropy 21(9), 2019, 818.
7. PALENČÁR, R. - ĎURIŠ, S. - PALENČÁR, J. - HALAJ, M. - ŠOÓŠ, Ľ.: Matrix presentation of uncertainties propagation in the realization of ITS-90 temperature scale

using standard platinum resistance thermometers. Measurement Science Review 20(2), 2020, 73-79.

8. WIMMER, G. - WITKOVSKÝ, V.: Model of polynomial calibration. Journal of Physics, 2018, 072011.

9. WITKOVSKÝ, V. - WIMMER, G.: Generalized polynomial comparative calibration: Parameter estimation and applications. In: Yurish, S.Y. (Ed.), Advances in Measurements and Instrumentation: Reviews. vol. 1. Barcelona, Spain, 2018, 15-52. International Frequency Sensor Association Publishing.

10. WITKOVSKÝ, V. - WIMMER, G. - DUBY, T.: Estimating the distribution of a stochastic sum of iid random variables. Mathematica Slovaca 70(3), 2020, 759-774.

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky riešenia projektu sa uplatnia v teórii spracovania výsledkov meraní, ako aj v metrologických a technických aplikáciách a experimentálnom výskume s dôrazom na korektnú analýzu neistôt výsledkov meraní.

Dosiahnuté výsledky publikované vo forme vedeckých článkov, monografií, učebníc a algoritmov, budú využívané

- pre ďalší rozvoj teórie vyhodnotenia kalibrácie, tvorbu špecifických modelov kalibrácie a korektné stanovenie neistôt v kalibrácii,

- pre kalibráciu senzorov a prevodníkov v rôznych oblastiach technickej a biomedicínskej praxe,

- pri kalibrácii meradiel v národnom metrologickom ústave (Slovenský metrologický ústav v Bratislave),

- pre realizáciu a vyhodnotenie medzilaboratórnych experimentov na úrovni národných metrologických ústavov,

- pri tvorbe noriem a štandardov v rámci SR, ako aj pre tvorbu medzinárodných noriem a štandardov ISO (International Standardization Organization), (TK 110 Metrológia, TK 71 Aplikácie štatistických metód v riadení kvality),

- pri výučbe v inžinierskom štúdiu Meranie a skúšobníctvo a v celoživotnom vzdelávaní na Sjf STU,

- v doktorandskom štúdiu, pri riešení dizertačných prác doktorandov Sjf STU, MÚ SAV a ÚM SAV, ako aj v národnom metrologickom ústave. Ich prostredníctvom sa vytvoria predpoklady aj pre šírenie výsledkov na ich budúce pracoviská.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Cieľom projektu bol rozvoj matematicko-štatistických metód a algoritmov pre vyhodnocovanie meraní s dôrazom na rozvoj modelov a metód v oblasti viacrozmernej kalibrácie meradiel a metód a algoritmov pre stanovenie neistôt v meraní pomocou určenia exaktných resp. aproximatívnych pravdepodobnostných rozdelení výsledkov merania.

- V oblasti teoretického výskumu matematicko-štatistických modelov a metód pre viacrozmernú kalibráciu boli navrhnuté nové modely viacrozmernej kalibrácie a odvodené ich teoretické riešenie pre špeciálne situácie. Nové výsledky boli dosiahnuté aj v oblasti rozvoja teórie zovšeobecnenej polynomickej komparatívnej kalibrácie so zložitou kovariančnou štruktúrou a za porušenia štandardných predpokladov o normalite rozdelenia chýb meraní. Okrem toho, boli navrhnuté metódy pre meranie zložitosti signálov, metódy pre konštrukciu (simultánnych) konfidenčných oblastí založených na tolerančných intervaloch, metódy štatistickej inferencie v zmiešaných lineárnych modeloch, ako aj metódy pre modelovanie združeného rozdelenia korelovaných náhodných premenných pomocou kopúl.

- V oblasti rozvoja kalibrácie snímačov boli experimentálne overené navrhnuté teoretické modely merania a kalibrácie. Navrhnuté boli algoritmické riešenia na efektívnu implementáciu navrhnutých postupov. Stanovené boli hodnoty vybraných fyzikálno-chemických veličín a implementácia navrhnutých teoretických výsledkov do konkrétnych postupov tak, aby tvorili základ metodiky vyhodnotenia kalibrácie v špičkových metrologických a kalibračných laboratóriách.

- V oblasti rozvoja metód a algoritmov pre určenie pravdepodobnostných rozdelení výsledkov merania a charakterizáciu neistôt v metrológii boli navrhnuté originálne metódy a postupy na určenie zložitých rozdelení a bola vytvorená databáza charakteristických funkcií

využitelných v oblasti analýzy meraní a v metrológii. Vytvorili sa algoritmy a metódy pre softvérový balík na výpočet pravdepodobnostných rozdelení numerickým invertovaním charakteristickej funkcie vo výpočtovom prostredí jazyka MATLAB (resp. R).

Počas riešenia projektu bolo publikovaných 155 rôznych publikačných výstupov súvisiacich s riešením projektu. Z toho 15 publikácií v karentovaných časopisoch (7 SR + 8 zahraničné), 38 publikácií v recenzovaných vedeckých časopisoch (15 SR + 23 zahraničné), 50 publikácií v nerecenzovaných odborných časopisoch a zborníkoch (37 SR + 13 zahraničné), 1 monografia v SR, 48 ostatných publikácií (publikované v zborníkoch abstraktov a na konferenciách v zahraničí ako aj publikácie pripravené a prijaté do tlače) a 3 popularizačné publikácie. Uvedené publikácie boli citované v karentovaných publikáciách SCI 44-krát (6 SR + 38 zahraničné) a 22 v ostatných typoch publikácií (podrobný rozpis je uvedený v správach Výstupy a prínosy projektu za uvedené roky riešenia projektu).

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

The aim of the project was the development of mathematical-statistical methods and algorithms for the evaluation of measurements with emphasis on the development of models and methods in the field of multidimensional calibration of meters and methods and algorithms for determining measurement uncertainties by determining exact resp. approximate probability distributions of the measurement results.

- In the field of theoretical research of mathematical-statistical models and methods for multidimensional calibration, new models of multidimensional calibration were proposed and their theoretical solution for special situations was derived. New results were also achieved in the field of the development of the theory of generalized polynomial comparative calibration with a complex covariance structure and in violation of standard assumptions about the normality of the distribution of measurement errors. In addition, methods for measuring signal complexity, methods for constructing (simultaneous) confidence regions based on tolerance intervals, methods for statistical inference in mixed linear models, as well as methods for modeling the combined distribution of correlated random variables using domes have been proposed.

- In the field of sensor calibration development, the proposed theoretical models of measurement and calibration were experimentally verified in cooperation with the project partners. Algorithmic solutions have been proposed for the effective implementation of the proposed procedures. The values of selected physico-chemical quantities and the implementation of the proposed theoretical results into specific procedures were determined so as to form the basis of the methodology of calibration evaluation in top metrological calibration laboratories.

- In the field of development of methods and algorithms for determining probabilistic distributions of measurement results and characterization of uncertainties in metrology, original methods and procedures for determining complex distributions were designed and a database of characteristic functions usable in measurement analysis and metrology was created. Algorithms and methods for a software package for calculating probability distributions by numerical inverting of a characteristic function in the MATLAB (or R) computational environment have been developed.

During the project solution, 155 different publication outputs related to the project solution were published. Of which 15 publications in peer-reviewed journals (7 SR + 8 foreign), 38 publications in peer-reviewed scientific journals (15 SR + 23 foreign), 50 publications in non-peer-reviewed professional journals and proceedings (37 SR + 13 foreign), 1 monograph in SR, 48 other publications (published in anthologies of abstracts and at conferences abroad as well as publications prepared and accepted for publication) and 3 popularization publications. The mentioned publications were cited in the SCI certified publications 44 times (6 SR + 38 foreign) and 22 in other types of publications (a detailed breakdown is given in the reports Outputs and benefits of the project for the mentioned years of the project solution).