

Arkadiusz WINNICKI, Mariusz OLSZEWSKI

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI I ROBOTYKI

Sliding Mode Control of electro-hydraulic servo system

Mgr inż. Arkadiusz WINNICKI

Absolwent (2003) Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zatrudniony jako asystent w Zakładzie Urządzeń Wykonawczych Automatyki i Robotyki. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się zagadnieniami algorytmów sterowania płynowymi urządzeniami wykonawczymi.



e-mail: a.winnicki@mchtr.pw.edu.pl

Prof. nzw. dr hab. inż. Mariusz OLSZEWSKI

Dyrektor Instytutu Automatyki i Robotyki na Wydziale Mechatroniki Pol. Warszawskiej, stypendysta niemieckiej Fundacji Alexandra v. Humboldta, członek konsorcjum Europejskiej Sieci Centrów Techniki Płynowej (FPCE). Specjalista i autor publikacji, książek, podręczników, patentów i wdrożeń z zakresu budowy i sterowania urządzeń wykonawczych automatyki, robotyki przemysłowej i mechatroniki. Ma duże doświadczenie w kierowaniu projektami krajowymi i międzynarodowymi.



e-mail: m.olszewski@mchtr.pw.edu.pl

Abstract

This paper presents the design of a new robust Sliding Mode Controller for the electro-hydraulic servo system. In classic approach of SMC unfavorable effects of frequent switches of the control signal appears. This phenomenon is called the chattering effect. To reduce this effect, a new method of the Sliding Mode Control design with changing switching gain along the Lagrange's multiplier is proposed. Simulation results and laboratory experiments indicate that the control approach is very robust and considerably improves the position tracking accuracy.

Keywords: Electro-hydraulic servo system, Sliding Mode Control, Lagrange's multiplier.

Algorytm sterowania ślizgowego w zastosowaniu do serwonapędu elektrohydraulicznego

Streszczenie

Artykuł prezentuje nowe podejście w użyciu algorytmu ślizgowego w zastosowaniu do serwonapędu elektrohydraulicznego. W klasycznym podejściu algorytmu ślizgowego pojawia się niepożądany efekt częstych przełączeń sygnału sterującego. W celu wyeliminowania tego zjawiska, w artykule zaproponowano użycie metody wyznaczników Lagrange'a. Wyniki symulacyjne jak i laboratoryjne wskazują na wysoką oporność układu na zakłócenia przy zachowaniu dobrych właściwości dynamicznych układu jak i „gładkim” sygnale sterującym.

Słowa kluczowe: Serwonapęd elektrohydrauliczny, algorytm ślizgowy, wyznaczniki Lagrange'a.

1. Introduction

Nowadays electro-hydraulic servo systems are very important tools for industrial processes because of their high power to weight ratio, high stiffness, and high payload capability. However, the control of electro-hydraulic systems can be a difficult problem since their dynamics are highly nonlinear [1, 2, 3]. For example it is not easy to tune the control parameters when designing the control system with classic control methods such as PID [1, 4, 5]. Therefore, the investigation of the position or force control for electro-hydraulic actuators should be of great interest from both academic and industrial perspectives. Some control techniques, for example adaptive control, sliding mode control and feedback linearization, are used to compensate for the nonlinear behavior of the hydraulic systems [6].

Variable-structure systems with a sliding mode were discussed first in the Soviet literature, and have been widely developed in recent years. Sliding mode controllers are designed to robustly control systems with the model imprecision, and are known to achieve almost perfect tracking. The price for the good performance, however, is extremely high control activity. The main drawback of the SMC is “chattering effect” which can excite undesirable high-frequency dynamics. Several methods of the chattering reduction have been reported in books and articles

[7, 8, 9]. One approach places a boundary layer around the switching surface such that the relay control is replaced by a saturation function. Another method replaces a max–min-type control by a unit vector function. These approaches, however, provide no guarantee of convergence to the sliding mode, and involve a tradeoff between chattering and robustness [6, 8].

This paper discusses the design of a sliding mode controller with the Lagrange's multiplier techniques to achieve a reduced chatter and system robustness against parameter uncertainty, disturbances, and nonlinearities. The proposed method was applied to a laboratory stand. Simulated and experimental results were obtained that verify the validity of the proposed method in terms of smooth sliding control and robust performance.

2. Controller Design

The hydraulic system for one axis may be described by 3-th order linear time-varying equation of the form (1):

$$y(s) = \frac{C\omega_0^2}{(s^2 + 2D\omega_0s + \omega_0)s} u(s), \quad (1)$$

or, in another form

$$y^{(3)}(t) + 2D\omega_0 y^{(2)}(t) + \omega_0^2 y^{(1)}(t) = C\omega_0^2 u(t), \quad (2)$$

$$y^{(3)}(t) + a_2(t)y^{(2)}(t) + a_1(t)y^{(1)}(t) = b(t)u(t) + d(t), \quad (3)$$

where $y(t)$ and $u(t)$ are output and input variables respectively. The coefficients $a_i(t)$, $i=0,1,2$ and $b(t)$ are time-varying parameters. We assume that their varying ranges are known as follows

$$\begin{aligned} a_{i_min} &\leq a_i(t) \leq a_{i_max}, \quad i=0,1,\dots,n-1 \\ b_{min} &\leq b(t) \leq b_{max} \end{aligned} \quad (4)$$

and $b(t) > 0$. The term $d(t)$ represents a disturbance of which the maximum absolute value, $\max |d(t)|$, is also assumed to be known.

Equation (1) can also be represented as the state equation of the form (5):

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} d(t) \\ y(t) &= [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Let us introduce the following first-order system that is related to (6).

$$\dot{x}_0 = x_{ref} - x_1, \tag{6}$$

where x_0 is a state variable and x_{ref} is a reference input.

The switching function σ to the augmented system (5) and (6) is chosen as

$$\sigma = \sum_{i=0}^n c_i x_i = c_0 x_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + x_3, \tag{7}$$

where $c_n = 1$ and c_i $i = 0, 1, \dots, n-1$ are positive coefficients ordered model of electro-hydraulic system.

The idea of the SMC algorithm is to the control law $u(t)$ aimed to $\sigma = 0$. In an on-line control, it is impossible to try mark σ , which would be equal to zero, because this would lead us to an extension of the time needed to calculate the parameters of the control signal. In this case, we can use Equation (8) which guarantees that the hitting condition is satisfied and the state reaches the manifold switching in the finite time.

$$\sigma \dot{\sigma} < 0 \tag{8}$$

Let us assume that the condition for a sliding hypersurface exists.

From (5), (6) and (7) we have:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \sum_{i=1}^n (a_{i-1} - c_{i-1})x_i + bu - c_0 x_{ref} + d = \\ &= (a_0 - c_0)x_1 + (a_1 - c_1)x_2 + (a_2 - c_2)x_3 + bu - c_0 x_{ref} + d \end{aligned} \tag{9}$$

We choose the control law in the form

$$u = \sum_{i=1}^n K_i x_i + K_0 = K_0 + K_1 x_1 + K_2 x_2 + K_3 x_3, \tag{10}$$

where K_i , $i = 0, 1, \dots, n$ are required gains. Using (9) and (10), we obtain

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}\sigma &= [(a_0 - c_0 + bK_1)x_1\sigma] + [(a_1 - c_1 + bK_2)x_2\sigma] + \\ &+ [(a_2 - c_2 + bK_3)x_3\sigma] + [(bK_0 - c_0 x_{ref} + d)\sigma] \end{aligned} \tag{11}$$

The trajectories move towards the sliding hypersurface ($\sigma = 0$) and continue on it if the gains K_i , $i = 0, 1, \dots, n$ are chosen as:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &\leq \min_{a_0, b} \frac{a_0 - c_0}{b} \quad \text{for } x_1\sigma > 0 \\ K_1 &\geq \max_{a_0, b} \frac{a_0 - c_0}{b} \quad \text{for } x_1\sigma < 0 \end{aligned} \right\}, \tag{12a}$$

$$\left. \begin{aligned} K_2 &\leq \min_{a_1, b} \frac{a_1 - c_1}{b} \quad \text{for } x_2\sigma > 0 \\ K_2 &\geq \max_{a_1, b} \frac{a_1 - c_1}{b} \quad \text{for } x_2\sigma < 0 \end{aligned} \right\}, \tag{12b}$$

$$\left. \begin{aligned} K_3 &\leq \min_{a_2, b} \frac{a_2 - c_2}{b} \quad \text{for } x_3\sigma > 0 \\ K_3 &\geq \max_{a_2, b} \frac{a_2 - c_2}{b} \quad \text{for } x_3\sigma < 0 \end{aligned} \right\}, \tag{12c}$$

$$\left. \begin{aligned} K_0 &= \frac{c_0}{b_{\max}} - R \cdot \text{sgn } \sigma \quad \text{for } x_{ref}\sigma > 0 \\ K_0 &= \frac{c_0}{b_{\min}} - R \cdot \text{sgn } \sigma \quad \text{for } x_{ref}\sigma < 0 \end{aligned} \right\}, \tag{12d}$$

where

$$R = \frac{\max_{b, d} |d|}{b} \tag{13}$$

On the basis of the state variables x_1, x_2, x_3, x_{ref} and the sign σ , in every step of algorithm the coefficients of K_0, K_1, K_2, K_3 are appointed. As a result, the control signal very quickly changes, but the arrangement shows a high robustness, what is visible in Fig. 1.

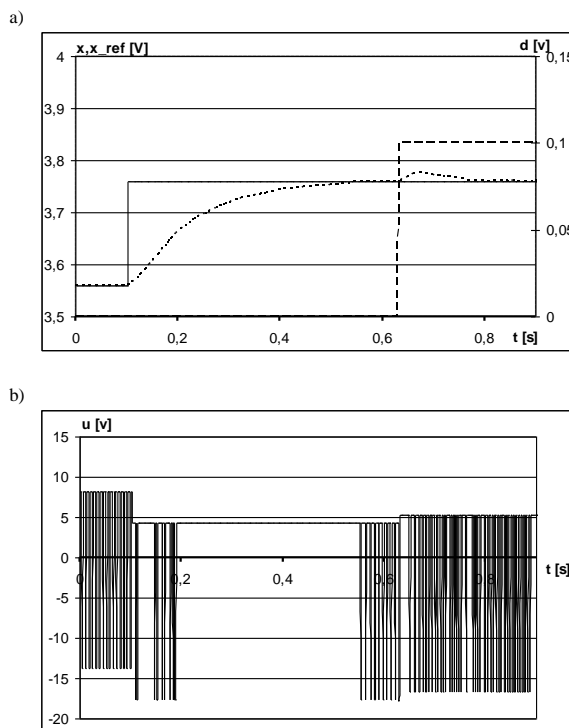


Fig. 1. Step respond with disturbance signal: a) reference, measured and disturbance signal; b) control signal

Rys. 1. Odpowiedź skokowa układu: a) sygnał zadany, mierzony i zakłócenie; b) sygnał sterujący

Due to the chattering effect it is necessary to search for another law of control. In this case, the method of the Lagrange's multiplier can be applied.

3. Lagrange's multiplier

To solve Equation (11), it is required to find the value of determinants K_i . In this goal, we introduce Equation (11) in another form:

$$\dot{\sigma}\sigma = r_0 K_0 + r_1 K_1 + r_2 K_2 + r_3 K_3 + r_4 \tag{14}$$

where:

$$\begin{cases} r_0 = b\sigma \\ r_1 = bx_1\sigma \\ r_2 = bx_2\sigma \\ r_3 = bx_3\sigma \\ r_4 = (a_0 - c_0)x_1\sigma + (a_1 - c_1)x_2\sigma + (a_2 - c_2)x_3\sigma + (d - c_0 x_{ref}) \end{cases} \tag{15}$$

It is necessary to solve the task of optimization in form:

$$\min \left[\frac{1}{2} (K_0^2 + K_1^2 + K_2^2 + K_3^2) \right] \tag{16}$$

at the limitation

$$r_0K_0 + r_1K_1 + r_2K_2 + r_3K_3 + r_4 < 0 \tag{17}$$

The solution of tasks (16) and (17) is as follows:

$$\begin{cases} K_0 = \frac{-r_0r_4}{r_0^2 + r_1^2 + r_2^2 + r_3^2} \\ K_1 = \frac{-r_1r_4}{r_0^2 + r_1^2 + r_2^2 + r_3^2} \\ K_2 = \frac{-r_2r_4}{r_0^2 + r_1^2 + r_2^2 + r_3^2} \\ K_3 = \frac{-r_3r_4}{r_0^2 + r_1^2 + r_2^2 + r_3^2} \end{cases} \tag{18}$$

4. Experimental Results

To demonstrate the performance of the proposed rule, the research has been done on an electro-hydraulic servo system on a testing stand, whose picture is presented in Figure 2.

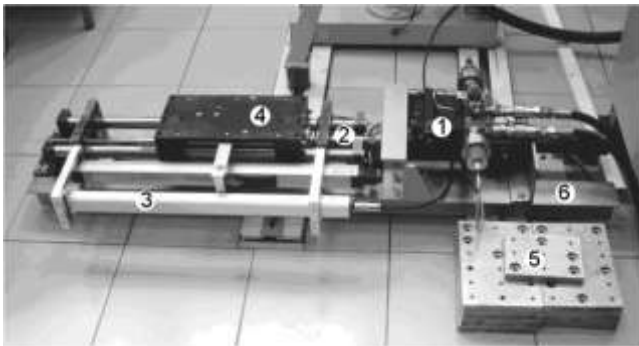


Fig. 2. View of the electro-hydraulic servo system: 1) servo-valve, 2) piston, 3) position encoder, 4) load platform, 5) mass, 6) support

Rys. 2. Stanowisko serwonapędu elektrohydraulicznego: 1) serwo-zawór, 2) siłownik, 3) n-koder, 4) wózek, 5) masa, 6) rama

The system consist of a hydraulic actuator, electro-hydraulic servo, pump, position encoder and computer with input/output cards.

The schematic diagram of the control system that is considered in this paper is shown in Figure 3.

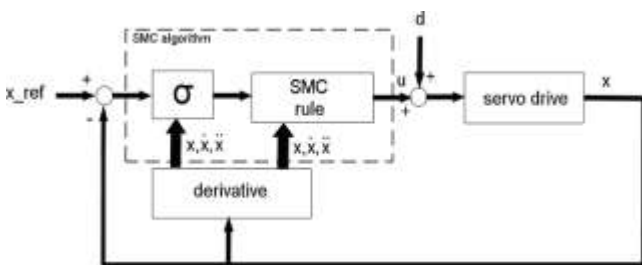


Fig. 3. Schematic diagram of the control system

Rys. 3. Schemat układu sterowania ślizgowego

Figure 4 shows the responses of the reference signal. As we can see, the control signal is much more smoother than the classic control SMC with the chattering effect but this signal isn't ideally smooth.

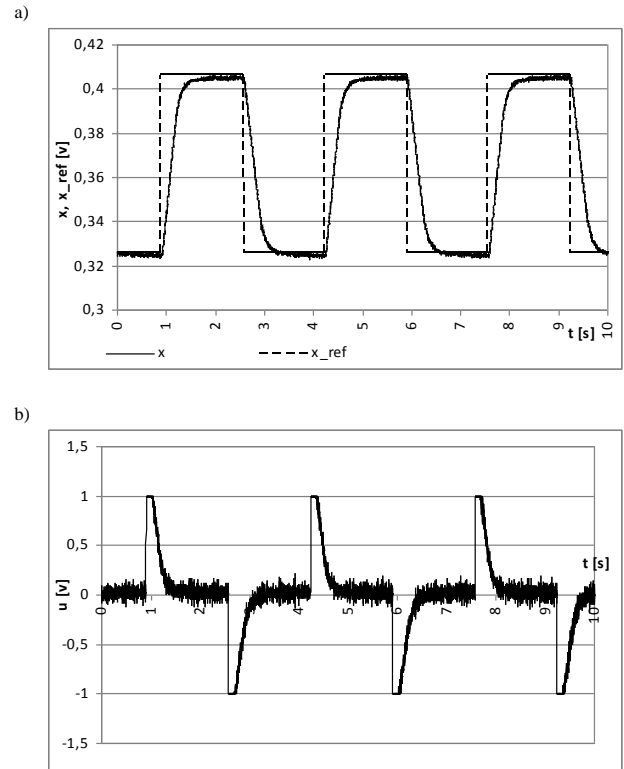


Fig. 4. Step response of the electro hydraulic servo drive: a) reference and measured signals; b) control signal

Rys. 4. Odpowiedź skokowa serwonapędu elektrohydraulicznego: a) sygnał zadany i mierzony; b) sygnał sterujący

In Figure 5, the same testing is presented but now a very strong signal of disturbance is added. As result, the response of the hydraulic system is almost identical as the response of the system without the disturbance signal.

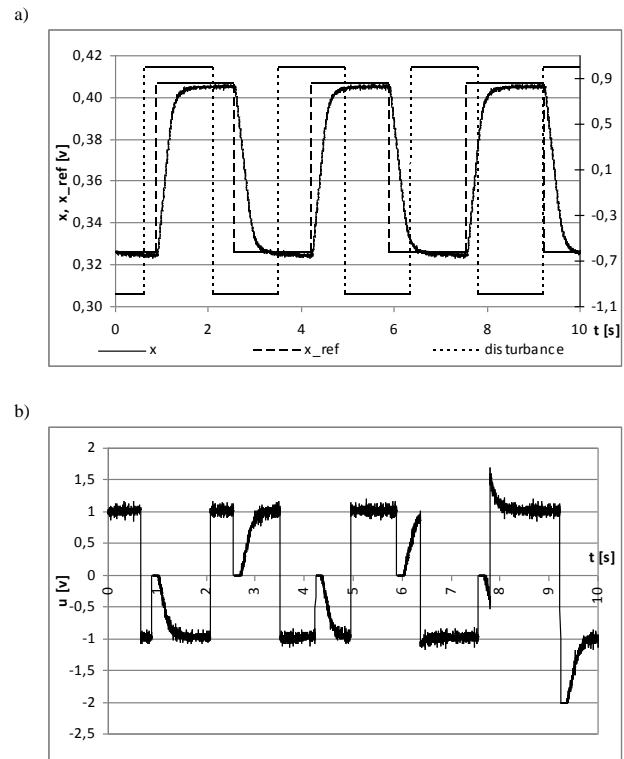


Fig. 5. Step response of the electro hydraulic servo drive with the disturbance signal: a) reference, measured and disturbance signals; b) control signal

Rys. 5. Odpowiedź skokowa serwonapędu elektrohydraulicznego wraz z sygnałem zakłócenia: a) sygnał zadany, mierzony i zakłócenie; b) sygnał sterujący

5. Conclusion

The paper shows the detailed design procedure of the dynamic integral sliding surface control. The central objective of the design is to demonstrate the robustness of the proposed controller. The control input is nearly smooth, and the compromise between the smoothness of the control input and the robustness recovery is obtained. The simulation results show that the proposed controller makes the system response - insensitive and provides a good performance for this highly nonlinear system.

6. References

- [1] Olszewski M.: Sterowanie pozycyjne pneumatycznego napędu siłownikowego. OWPW, Warszawa 2002.
- [2] Olszewski M.: Basics of Servopneumatics, VDI Verlag, Düsseldorf 2008.
- [3] Winnicki A.: Sliding Mode Control for Hydraulic Servo System. *Hydraulica a Pneumatica*, 22 (2006) 3-4, 32-34.
- [4] Winnicki A, Olszewski M.: Control of an electro-hydraulic position servo system using SMC, *Hydraulica a Pneumatica* 24 (2008) 1-2, 27-29.
- [5] Perruquetti W., Barbot J.: *Sliding Mode Control in Engineering*. Marcel Dekker Inc., New York 2002.
- [6] Ha Q., Nguyen Q., Rye D., Durrant-Whyte H.: Fuzzy Sliding-Mode Controllers with Applications. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 40 (2001) 1, 38-46.
- [7] Spurgeon S.K., Edwards C.: *Sliding Mode Control*. Taylor and Francis, London 1998.
- [8] Hikita H.: Servomechanisms Based on Sliding Mode Control. *International Journal of Control*, 48 (1988) 2, 435-447.
- [9] Liu Y., Handroos H.: Technical note Sliding mode control for a class of hydraulic position servo. *Mechatronics* 9 (1999), 111-123.
- [10] Private correspondence with J. Pułaczewski, Warsaw 2007.

Artykuł recenzowany

RECENZJE

Metody oceny niepewności pomiarów

Roman Janiczek
ISBN 8360716-47-1



Jest to ostatnia książka Romana Janiczka, profesora Politechniki Częstochowskiej, wydana przez Komisję Metrologii Oddziału PAN w Katowicach. Dotyczy ona zagadnień podstawowych techniki pomiarowej, odnoszących się do wszystkich wielkości mierzalnych.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia na bazie logicznych podstaw pomiaru i obowiązujących dokumentów normatywnych skale pomiarowe i niejednoznaczność odwzorowań rzeczywistości na liczby. Jest to oryginalne ujęcie

autorskie tej problematyki, przedstawione w przystępny sposób.

W rozdziale drugim przedstawione są podstawy modelowania sygnałów i systemów w ujęciu energetycznym. Podstawy teoretyczne są zilustrowane przykładami przetworników elektromechanicznych: indukcyjnościowego do pomiaru siły oraz magnetoelektrycznego do pomiaru natężenia prądu, w zastosowaniach do pomiarów przykładowych wielkości fizycznych. Autor omawia ograniczenia dokładności modelu, ilustrując tezę, że modelowanie jest próbą odzwierciedlenia rzeczywistości przez opis matematyczny.

W rozdziale trzecim scharakteryzowane są czynniki otoczenia, najczęściej wpływające na wyniki pomiarów różnych wielkości i powodujące różne błędy składowe. Są one przedmiotem tradycyjnej oceny błędów pomiaru, jaką przedstawiono w rozdziale czwartym. Wyróżniono błędy systematyczne, przypadkowe i graniczne mające zastosowanie do wyznaczania np. klas dokładności. W obszernym rozdziale piątym przedstawione są elementy szacowania niepewności według

zalecanych aktualnie modeli. Jako przykłady są analizowane wybrane typowe niepewności składowe, takie jak wynikające z histerezy czy rozdzielczości wskazań przyrządów cyfrowych.

W rozdziale 6 przedstawione jest alternatywne podejście do oceny niepewności, oparte na entropijnych miarach oceny jakości wyników pomiarów. To podejście może mieć zastosowanie do ocen niepewności w systemach cyfrowych.

W rozdziale 7 przedstawione są elementy analizy wymiarowej, wykorzystywane do planowania eksperymentów złożonych, w których pewne parametry są trudno mierzalne i muszą być obliczane z wyników pomiarów pośrednich. W rozdziałach końcowych przedstawione są przykładowe problemy oceny niepewności w pomiarach przemysłowych, zilustrowane obliczeniami symulacyjnymi.

Problemy są przedstawione w książce jasno i przystępnie, z licznymi odwołaniami do przykładów, znanych Autorowi z długoletniej współpracy z przemysłem. Książka jest adresowana do studentów kierunków technicznych, pracowników naukowych oraz personelu laboratoriów o wdrożonym systemie jakości. W bibliografii Autor zebrał najistotniejsze pozycje książkowe dotyczące różnych aspektów opracowania wyników pomiarów.

Książka ta jest podsumowaniem wieloletnich przemysłań i własnego doświadczenia Autora. Może być polecana jako podręcznik uzupełniający do wykładów z teorii pomiaru i praktyki eksperymentu.

Autor nie doczekał wydania tej pracy. W drodze na spotkanie z redaktorem Ossolineum zginął w niezawinionym wypadku drogowym, w pełni sił twórczych. Przez tę książkę będzie jednak jeszcze długo obecny w środowisku metrologów.

Opracowanie: Prof. Tadeusz SKUBIS