

Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII I AUTOMATYKI ELEKTROTECHNICZNEJ

Konwejer prądowy mnożący w układach selektywnych typu ELIN

Dr hab. Inż. Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI,
Prof. Politechniki Śląskiej

Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej (do roku 2002 Instytutu Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej) Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jego działalność naukowa i dydaktyczna dotyczy zagadnień związanych z teorią obwodów elektrycznych i elektronicznych, szczególnie analizą i syntezą układów aktywnych, modelowaniem układów elektronicznych za pomocą elementów osobliwych oraz konstrukcji i zastosowań nowoczesnych wzmacniaczy operacyjnych w tym analogowych układów sterowanych i programowalnych. Jest autorem i współautorem ponad 120 prac naukowych opublikowanych w kraju i za granicą, 2 monografii oraz 5 skryptów dydaktycznych i 4 podręczników akademickich.



ltk@polsl.gliwice.pl

Streszczenie

Przedstawiono koncepcję układu konwejera prądowego wielozaciskowego, którego prąd wyjściowy zacisku Z jest iloczynem prądów zacisków X, nazywanego konwejerem prądowym mnożącym (CCIIM). Pokazano propozycje jego realizacji: scalonej CMOS oraz z zastosowaniem układów dyskretnych typu WO i AUM. Jako przykład, zastosowano go do realizacji układów różniczkujących typu ELIN. Przedstawiono wyniki symulacji komputerowej idealnego układu różniczkujących typu ELIN, uzasadniających jego nazwę.

Abstract

Conception of multiterminal current conveyor with its Z terminal output current being the product of X terminal currents, has been presented. That device is called multiplying current conveyor (CCIIM). Suggestion of its realisation in integrated form made in CMOS techniques, using four-terminal cell described by non-linear dependences (2) and (3), has been shown. That realisation leads to CCIIM circuit presented in Fig. 4, described by the relations (4) to (7). The realization by using discrete circuits of operational amplifier and analogue multiplier circuit type, is shown in Fig. 5 and described by dependences (8) and (9). realisation of differentiating circuits of ELIN (externally linear, internally nonlinear) type: theoretical ones presented in Fig. 9. The examples of selective circuits of ELIN type with tuned parameters, shown in Fig. 10 and 11, have been also presented. The results of computer simulation for ideal differentiating circuits of ELIN type, supporting its name, have been presented.

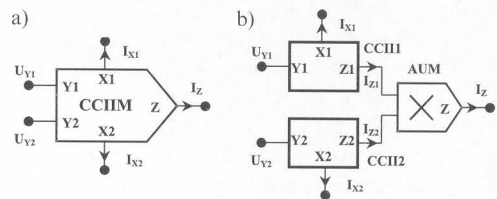
Słowa kluczowe: konwejer prądowy, układ mnożący, układ różniczkujący
Keywords: current conveyor, analogue multiplier, differentiating circuits

1. Wstęp

W ostatnich latach pojawiło się duże zainteresowanie aktywnymi układami analogowymi zawierającymi bloki nieliniowe, a stosowane do liniowej filtracji sygnałów. Związane jest to z wymaganiami technicznymi wytwarzanych obecnie układów scalonych, np. radykalnym zmniejszeniem napięć źródeł zasilających. Układy te nazywane są „zewnętrznie liniowymi, wewnętrznie nieliniowymi”, czyli typu ELIN (externally linear, internally nonlinear). Analizę ich prowadzi się metodą wielkosygnałową z uwzględnieniem rzeczywistych charakterystyk nieliniowych zastosowanych elementów elektronicznych. Najczęściej stosowanymi blokami są układy integratorów pracujące dla funkcji logarytmicznych i wykładniczych z zastosowaniem złącz półprzewodnikowych, oraz funkcji pierwiastkowej lub kwadratowej z wykorzystaniem tranzystorów polowych MOS. Projektowane są one jako układy zintegrowane w technice bipolarnej lub CMOS, pracujące także przy bardzo małych sygna-

łach prądowych, przez co zwane są układami mikromocowymi. W przypadku układów dyskretnych mogą tu mieć zastosowanie przede wszystkim takie układy scalone jak analogowe układy mnożące, lub każde inne analogowe wzmacniacze elektroniczne (np. CCII, OTA, CAF itp.), z dodatkowymi elementami nieliniowymi.

W niniejszej pracy proponuje się układ łączący w sobie właściwości konwejera prądowego (CCII) z analogowym układem mnożącym prądy (AUM) i nazwany konwejerem prądowym mnożącym (CCIIM), (rys. 1a).



Rys. 1. Konwejer prądowy mnożący – symbol (a) oraz schemat blokowy (b)
Fig. 1. Multiplying current conveyor: symbol (a) and block diagram (b)

Opisują go zależności:

$$u_{x1} = u_{y1}, \quad u_{x2} = u_{y2}, \quad i_z = k i_{x1} i_{x2} \quad (1)$$

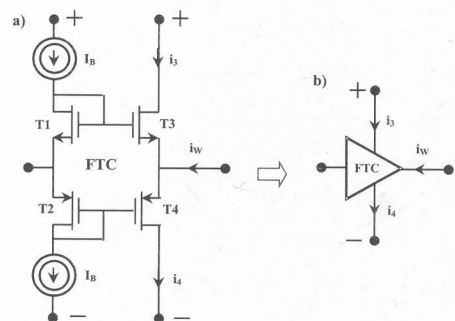
na podstawie których może być zamodelowany blokowo za pomocą dwóch konwejerów prądowych i prądowego analogowego układu mnożącego (rys. 1b).

2. Realizacje praktyczne prądowego konwejera mnożącego

Podstawowym układem do realizacji CCIIM w technice CMOS jest cztero-tranzystorowa komórka (FTC – four transistor cell), pokazana na rys. 2. Prądy tranzystorów T3 i T4 opisują zależności:

$$i_3 = I_B \left(1 - \frac{i_w}{4I_B}\right)^2 \quad (2)$$

$$i_4 = I_B \left(1 + \frac{i_w}{4I_B}\right)^2 \quad (3)$$

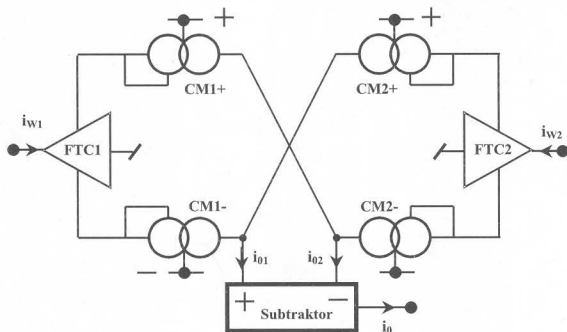


Rys. 2. Cztero-tranzystorowa komórka CMOS (FTC) – schemat (a) oraz symbol (b)

Fig. 2. CMOS four-transistor cell (FTC): diagram (a) and symbol (b)



Łącząc dwie takie komórki za pomocą luster prądowych o skrzyżowanych wyjściach oraz odejmując ich prądy wyjściowe za pomocą subtraktora otrzymuje się układ z rys. 3 realizujący sumę kwadratów prądów wejściowych, opisany zależnościami:



Rys. 3. Układ dwóch komórek FTC połączonych lustrami prądowymi
Fig. 3. Two CMOS FTC connected together by current mirrors

$$i_{01} = I_B(1 - \frac{i_{w2}}{4I_B})^2 - I_B(1 + \frac{i_{w1}}{4I_B})^2 \tag{4}$$

$$i_{02} = I_B(1 - \frac{i_{w1}}{4I_B})^2 - I_B(1 + \frac{i_{w2}}{4I_B})^2 \tag{5}$$

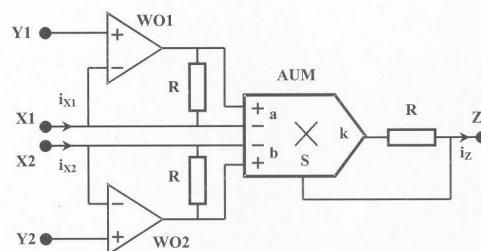
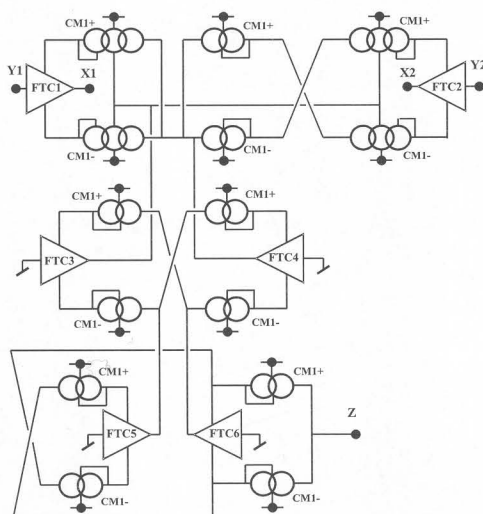
stąd:

$$i_0 = i_{01} - i_{02} = \frac{(i_{w2})^2 - (i_{w1})^2}{8I_B} \tag{6}$$

Jeżeli prądy wejściowe i_{w1} , i_{w2} będą odpowiednio sumą i różnicą właściwych prądów wejściowych i_{x1} , i_{x2} zacisków X1 i X2 konwejera CCIIM, wtedy prąd wyjściowy i_z jego zacisku Z będzie miał wartość:

$$i_z = \frac{(i_{x1} + i_{x2})^2 - (i_{x1} - i_{x2})^2}{8I_B} = \frac{i_{x1}i_{x2}}{2I_B} \tag{7}$$

Zrealizować go można w technice CMOS w postaci układu pokazanego blokowo na rys. 4, nadającego się do wykonania w postaci scalonej. Do zastosowań laboratoryjnych lub jednostkowych, konwejer prądowy mnożący można wykonać z zastosowaniem dwóch wzmacniaczy operacyjnych oraz jednego analogowego układu mnożącego z wejściami różnicowymi i dodatkowym wejściem sumującym S (np. AD630), połączonych jak na rys. 5.



Rys. 5. Konwejer prądowy mnożący zrealizowany z zastosowaniem dwóch WO i napięciowego analogowego układu mnożącego
Fig. 5. Multiplying current conveyor realised by using two OA and voltage analogue multiplier

Zakładając, że układ mnożący opisuje relacja:

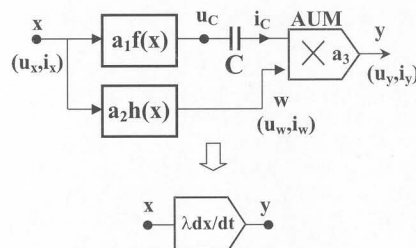
$$U_0 = k[(U_{a1} - U_{a2})(U_{b1} - U_{b2})] + U_S \tag{8}$$

wtedy prąd wyjściowy konwejera mnożącego z rys. 5 ma wartość:

$$i_z = \pm a i_{x1} i_{x2} \tag{9}$$

3. Układy różniczkujące wewnętrznie nieliniowe

Analogicznie jak to ma miejsce dla układu całkującego, teoretyczna struktura układu różniczkującego typu ELIN zawiera jeden analogowy układ mnożący (AUM) oraz dwa bloki funkcyjne połączone jak na rys. 1.



Rys. 6. Teoretyczny model układu różniczkującego typu ELIN
Fig. 6. Theoretical model of differentiating circuits of ELIN type

W układzie tym sygnały x , w i y mogą być zarówno prądowe jak i napięciowe, natomiast sygnał wyjściowy bloku f podawany na pojemność C musi być napięciowy, a sygnał wejściowy bloku mnożącego na zacisku, do którego podłączona jest ta pojemność powinien być prądowy (nisko-impedancyjny zacisk uziemiony). W układzie tym spełnione są zależności:

$$u_c = a_1 f(x) \tag{10}$$

$$w = a_2 h(x) \tag{11}$$

$$y = a_3 w i_c \tag{12}$$

Prąd płynący przez pojemność ma wartość:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = a_1 C f'(x) \frac{dx}{dt} \tag{13}$$

Stąd po wstawieniu (4) i (2) do (3) sygnał wyjściowy określa relacja:

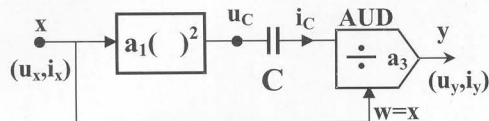
$$y = a_1 a_2 a_3 k C \frac{dx}{dt} = \lambda \frac{dx}{dt} \tag{14}$$

Aby opisany obwód był liniowym układem różniczkującym należy funkcje h i f dobrać tak, aby spełniona była zależność:

$$h(x) f''(x) = k \tag{15}$$

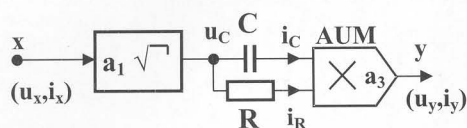
Rys. 4. Realizacja konwejera mnożącego (CCIIM) w technice CMOS z zastosowaniem sześciu komórek FTC oraz siedmiu par komplementarnych luster prądowych
Fig. 4. Realisation of multiplying conveyor (CCIIM) in CMOS techniques with application of six FTC and seven pairs of complementary current mirrors

Dobierając przykładowo funkcję f jako kwadratową lub pierwiastkową otrzymuje się układy różniczkujące o strukturach teoretycznych pokazanych na rysunkach 7 i 8.



Rys. 7. Układ różniczkujący typu ELIN dla funkcji $f=x^2$

Fig. 7. Differentiating circuit of ELIN type for function $f=x^2$



Rys. 8. Układ różniczkujący typu ELIN dla funkcji $f=\sqrt{x}$ z prądowym układem mnożącym

Fig. 8. Differentiating circuit of ELIN type for function $f=\sqrt{x}$ with current multiplier

4. Realizacje układów typu ELIN z zastosowaniem CCIIM

Przylączając do zacisków X1 i X2 mnożącego konweyera prądowego pojemność C i konduktancję G , oraz do zacisków wejściowych Y1 i Y2 dwójnik nieliniowy R_N o charakterystyce pierwiastkowej (rys. 9), otrzymuje się prądowy układ różniczkujący typu ELIN opisany zależnością:

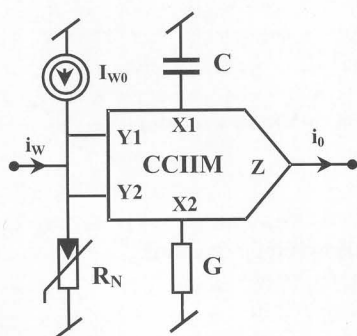
$$u_w = \beta \sqrt{i_w + I_{w0}} \quad (16)$$

$$i_{X1} = C \frac{du_w}{dt} = \frac{\beta C}{2\sqrt{i_w + I_{w0}}} \cdot \frac{di_w}{dt} \quad (17)$$

$$i_{X2} = \beta G \sqrt{i_w + I_{w0}} \quad (18)$$

Stąd prąd wyjściowy:

$$i_0 = k i_{X1} i_{X2} = k \beta^2 C G \frac{di_w}{dt} \quad (19)$$



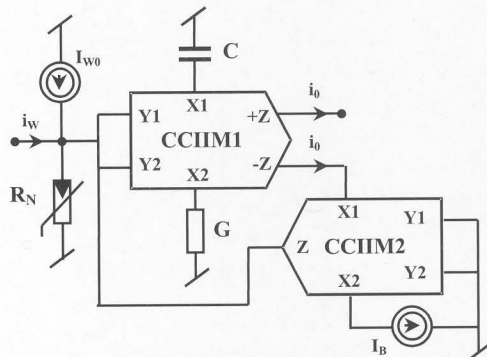
Rys. 9. Prądowy układ różniczkujący typu ELIN dla funkcji $f=\sqrt{x}$

Fig. 9. Current differentiating circuit of ELIN type for function $f=\sqrt{x}$

W konweyerze prądowym mnożącym można zwiększyć ilość wyjść np. w celu wykonania sprzężenia zwrotnego, przez dodanie dodatkowych wyjściowych luster prądowych. Pozwala to na zbudowanie prądowego układu górnoprzepustowego typu ELIN (rys. 10), opisanego równaniem różniczkowym:

$$i_0 + k^2 \beta C G I_B \frac{di_0}{dt} = k^2 \beta C G \frac{di_w}{dt} \quad (20)$$

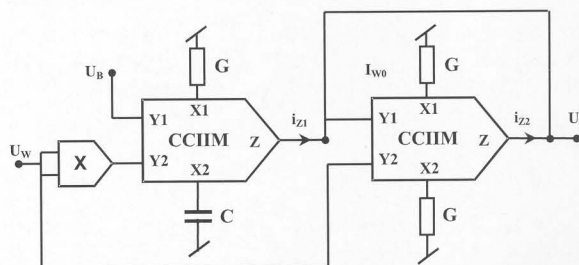
Dodatkowy konweyer prądowy mnożący CCIIM pozwala po przez zmianę wartości prądu I_B przestrajać częstotliwość graniczną filtra. Układy górnoprzepustowe rzędów wyższych można uzyskać przez ich szeregowe połączenie z odpowiednim sprzężeniem zwrotnym na wejście układu.



Rys. 10. Górnoprzepustowy układ rzędu pierwszego z konweyerem prądowym o dwóch wyjściach i przestrajaną częstotliwością graniczną

Fig. 10. High-pass circuit of first order complete with current conveyer having two outputs and tuned boundary frequency

Układ różniczkujący dla sygnałów napięciowych można zbudować z zastosowaniem dwóch CCIIM oraz jednego układu mnożącego w oparciu o koncepcję typu ELIN z kwadratową funkcją przetwarzania (rys. 11).



Rys. 11. Napięciowy układ różniczkujący typu ELIN z kwadratową funkcją przetwarzania i przestrajanym współczynnikiem różniczkowania

Fig. 11. Voltage differentiating circuit of ELIN type with square conversion function and tuned differentiating coefficient

Prądy wyjściowe obu konweyerów opisują zależności:

$$i_z = k G C U_B \frac{du_1}{dt} = 2k G C U_B u_w \frac{du_w}{dt} \quad (21)$$

$$i_z = k G^2 u_0 u_w \quad (22)$$

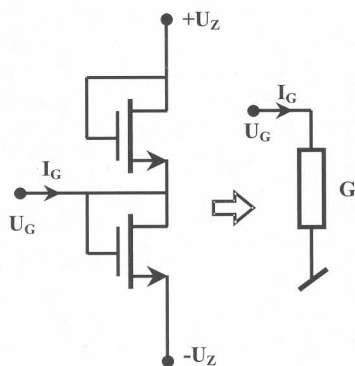
Przy braku prądowego obciążenia wyjścia muszą one być sobie równe, co implikuje zależność:

$$u_0 = 2 \frac{C}{G} U_B \frac{du_w}{dt} \quad (23)$$

Pozwala on na przestrajanie współczynnika różniczkowania zmianą wartości napięcia U_B . Występujące w przedstawionych przykładach obwodów konduktancje G mogą być zrealizowane w technice MOS jako para tranzystorów pokazana na rys. 12, o wartości opisanej zależnością:

$$G = \frac{I_G}{U_G} = 2K(U_Z - U_T) \quad (24)$$

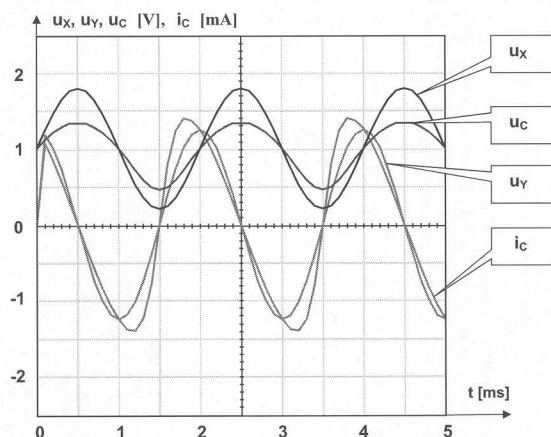
Gdzie K jest współczynnikiem transkonduktancyjnym tranzystora, a U_T ich napięciem progowym.



Rys. 12. Konduktancja G symulowana dwoma tranzystorami MOSn.
Fig. 12. G conductance simulated by means of two MOSn transistors

5. Symulacje komputerowe

W celu zilustrowania zasady pracy układu różniczkującego typu ELIN przeprowadzono symulację jego wersji z pierwiastkową funkcją przetwarzania z rys. 8. W symulowanym obwodzie zastosowano idealne modele układów nieliniowych. Na rys. 13 pokazano przebiegi zadanego sygnału wejściowego $u_x(t)$ oraz otrzymane z symulacji: wyjściowy $u_y(t)$ oraz w wewnętrznych punktach układu $i_c(t)$ i $w(t) = u_c(t)$.



Rys. 13. Przebiegi czasowe sygnałów zewnętrznych i wewnętrznych układu różniczkującego typu ELIN z pierwiastkową funkcją przetwarzania
Fig. 13. Waveform for external and internal signals of differentiating circuit of ELIN type with root function of conversion

Przy wejściowym sygnale sinusoidalnym o dużej składowej stałej, ze względu na wymóg $u_x > 0$, sygnał wyjściowy jest także sinusoidalny. Natomiast sygnały wewnętrzne układu są wyraźnie odkształcone, przy czym jego wielkość zależy od amplitudy składowej stałej i zmiennej sygnału wejściowego. Uzasadnia to nazwanie opisywanego układu zewnętrznie liniowym, a wewnętrznie nieliniowym.

6. Wnioski końcowe

Przedstawiona koncepcja konwejera prądowego mnożącego pozwala na realizację układów różniczkujących w klasie obwodów typu ELIN, które nie były dotychczas nie były brane pod uwagę w tego typu układach.

Literatura

- [1] Gilbert B.: Translinear circuits: an historical review. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, no. 2, 1996.
- [2] Frey D. R.: Exponential state space filters: a generic current mode design strategy. *IEEE Trans. on CAS-I*, vol. 43, No. 1, 1996.
- [3] Tsvividis Y. P.: Externally linear integrators. *IEEE Trans. on CAS-II*, vol. 45, No. 9, 1998.
- [4] Enz Ch., Punzenberger M., Python D.: Low-voltage log-domain signal processing in CMOS and BiCMOS. *IEEE Trans. on CAS-I*, vol. 46, No. 3, 1999.
- [5] Minch B. A.: Synthesis of dynamic multiple-input translinear element networks. *Proc. of the IEEE IS on CTAS*, Geneva 2000.
- [6] Topór-Kamiński L., Holajn P.: Wielozaciskowy konwejer prądowy. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej – Monografia, (stron 162), Gliwice 2001.
- [7] Minch B. A.: Multiple-input translinear element log-domain filters. *IEEE Trans. on CAS II*, no 1, 2001.
- [8] Topór-Kamiński L., Piłśniak A.: Wewnętrznie nieliniowe selektywne obwody dolnoprzepustowe w dziedzinie funkcji dzielenie/mnożenie – komputerowe badania symulacyjne. VII ZKWE, Poznań/Kieirz, 2003.
- [9] Topór-Kamiński L., Piłśniak A., Holajn P.: Wielozaciskowy konwejer prądowy w selektywnych układach wewnętrznie nieliniowych z elementem o kwadratowej funkcji przetwarzania. V MSKAE, Częstochowa, 2003.

Title: Multiplying current conveyor in selective circuits of ELIN type

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Ukazała się kolejna publikacja dotycząca tematyki pomiarów termowizyjnych. Wydanie publikacji dofinansował Komitet Badań Naukowych. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej wydało w miesiącu kwietniu 2004 roku w nakładzie 300 egz. książkę **POMIARY TERMOWIZYJNE – Przyrządy i Metody** autorstwa dr hab. inż. W. Minkiny profesora Politechniki Częstochowskiej.

Monografia **POMIARY TERMOWIZYJNE – Przyrządy i Metody** przedstawia stan wiedzy dotyczący teorii pomiarów termowizyjnych oraz metod zdalnego (bezstykowego) pomiaru temperatury z wykorzystaniem techniki termowizyjnej. Jest to nowa na polskim rynku wydawnictw technicznych książka ujmująca **od strony metrologicznej interdyscyplinarne zagadnienia pomiarów termowizyjnych**.

Treść książki ukazana jest w 12 rozdziałach uzupełnionych bogatym wykazem literatury umożliwiającym Czytelnikowi pogłębianie wiadomości w wybranych zagadnieniach. Dla praktyków wykorzystujących w pomiarach technikę termowizyjną przydatne mogą być zamieszczone na końcu tabeli emisyjności metali i innych materiałów.

Książkę recenzowali Profesorowie Politechniki Łódzkiej Zygmunt Kuśmierk i Bogdan Więcek.

Dystrybucję książki prowadzi Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej ul. Dąbrowskiego 69.

Tadeusz Ustaborowicz
AGENDA WYDAWNICZA PAK