

doi:10.15199/48.2019.09.35

# Techniki szybkiego wytwarzania prototypowych obwodów drukowanych

**Streszczenie.** W artykule omówiono laboratoryjne techniki (metody) wytwarzania prototypowych obwodów drukowanych, umożliwiające wykonanie obwodu w relatywnie krótkim czasie. Skupiono się na wykonywaniu jednostronnych płytek PCB z laminatów typu FR4 z wykorzystaniem metody fotochemicznej, metody frezowania oraz metody mikroobróbki laserowej. W pracy omówiono m.in. etapy wytwarzania obwodów drukowanych w wybranych technikach oraz na przykładzie testowego wzoru umieszczonego na płycie PCB dokonano analizy dokładności poszczególnych technik.

**Abstract.** The article discusses laboratory techniques (methods) for the production of prototype printed circuits boards that enable making the circuits in a relatively short time. The focus was on making one-sided PCBs of FR4 laminates using the photochemical method, the milling method and the micro-machining laser method. At work, among others the stages of manufacturing printed circuits in selected techniques were discussed and on examples of PCB tests the advantages and disadvantages of these techniques were analyzed. (**Techniques for rapid production of prototype printed circuit boards**).

**Słowa kluczowe:** obwód drukowany PCB, technika fotochemiczna, technika frezowania, technika mikroobróbki laserowej.

**Keywords:** printed circuit board (PCB), photochemical method, milling method, micro-machining laser method.

## Wprowadzenie

Prototypowy obwód drukowany, stanowiący podłoże i fizyczne połączenia elektryczne dla elementów elektronicznych składających się na układ elektroniczny, może być wykonany przez projektanta samodzielnie z wykorzystaniem określonej techniki lub wyprodukowany przez zakład produkcyjny, zajmujący się wytwarzaniem płyt PCB na podstawie plików produkcyjnych generowanych z wykorzystaniem dedykowanych programów typu CAD (*computer aided design*). Niestety, wytworzenie jednej prototypowej płytki drukowanej w sposób przemysłowy jest czasochłonne i kosztowne, szczególnie wówczas, jeżeli zaprojektowany układ wymaga pewnych dodatkowych modyfikacji. Z kolei, wykonanie płyty drukowanej we własnym zakresie w warunkach laboratoryjnych jest procesem bardzo szybkim w porównaniu do metody przemysłowej i pozwala na wytworzenie PCB, montaż elementów i uruchomienie układu w przeciągu kilku godzin. Dotyczy to w szczególności obwodów z jednostronną i dwustronną warstwą miedzi. Do laboratoryjnych technik wytwarzania obwodów drukowanych zalicza się m.in. technikę fotochemiczną, technikę termotransferu, technikę frezowania i technikę mikroobróbki laserowej. Ze względu na niskie koszty, do najpopularniejszych należą dwie pierwsze wymienione techniki, natomiast frezowanie i obróbka z wykorzystaniem promieniowania laserowego wymaga zakupu relatywnie drogich urządzeń. Jednakże, w przypadku płyt PCB z dużą gęstością upakowania ścieżek i pól lutowniczych o wymiarach i odstępach równych około 100  $\mu\text{m}$ , ich wykonanie w laboratorium jest możliwe jedynie z zastosowaniem dwóch ostatnich technik.

W niniejszej pracy, na przykładzie aparatury zainstalowanej w laboratoriach Uniwersytetu Morskiego w Gdyni (UMG), scharakteryzowano trzy techniki wytwarzania jednowarstwowych obwodów drukowanych: fotochemiczną, frezowania i mikroobróbki laserowej. Z użyciem testowej maski wzoru wytworzonego za pomocą rozważanych technik na laminacie typu FR4, dokonano analizy dokładności poszczególnych technik.

## Opis technik wytwarzania obwodów drukowanych

W technice fotochemicznej zaprojektowane połączenia drukowane nanoszone są z programów CAD (np. Eagle lub DipTrace), z użyciem drukarki laserowej, na arkusze kalki technicznej [1]. Jakość fotoszablonów wpływa istotnie na jakość obwodów drukowanych. Uzyskane fotoszablony

wykorzystywane są następnie do naświetlania promieniowaniem ultrafioletowym ( $\lambda \approx 360 \text{ nm}$ ), wytwarzanym przez lampy jarzeniowe (np. urządzenie LPKF 300-245), laminatów pokrytych warstwą światłoczułych polimerów. Typowo, czas naświetlania wynosi około 2,5 minuty. Naświetlone płyty umieszczane są w wodnym roztworze wodorotlenku sodu (np. związek SENO 4007) w celu usunięcia polimeru, który poddany był naświetleniu. Proces wywoływania płyty drukowanej kończy się kąpielą wodną, po czym płyta umieszczana jest w kąpieli trawiącej w wodnym roztworze nadsiarczanu sodowego (np. związek B327) o temperaturze około 40°C. Czas trawienia zależy od stopnia nasycenia roztworu trawiącego, przy czym typowo nie jest dłuższy niż pół godziny. Proces trawienia kończy się kąpielą wodną i zmyciem polimeru pokrywającego połączenia drukowane (np. z użyciem acetonu). Następnie, przystępuje się do wycięcia płytki PCB z właściwymi wymiarami i kształtem oraz wiercenia otworów w polach lutowniczych.

Z kolei, w technice frezowania połączenia drukowane wykonywane są z użyciem dedykowanej mikrofrezarki – ProtoMat S62 firmy LPKF [1, 2]. Rozważane urządzenie CNC (*computerized numerical control*) cechuje się m.in. rozdzielczością przesuwu głowicy roboczej niezależnie od kierunku równą 0,25  $\mu\text{m}$ , minimalną średnicą otworów równą 0,2 mm, natomiast minimalny frezowany odstęp pomiędzy połączeniami drukowanymi jest równy 0,1 mm. Obróbka płyty drukowanej polega na separacji zaprojektowanych połączeń drukowanych od niewykorzystywanego obszaru miedzi. Należy zaznaczyć, że im większa jest szerokość separacji tym dłużej wykonywana jest płyta. W procesie frezowania istnieje również możliwość usunięcia niewykorzystywanej warstwy miedzi w całości lub części, przy czym proces wykonywania płyty znacznie się wydłuża i skutkuje szybszym zużyciem frezów. W trakcie pracy frezarka wykorzystuje frezy i wiertła umieszczane w koszu narzędziowym zawierającym dziesięć uchwytów. Narzędzia te umieszcza się w uchwytach po załadowaniu do programu komputerowego BoardMaster, obsługującego frezarkę, projektu płytki drukowanej w formacie odpowiedniego pliku produkcyjnego. Taki plik tworzony jest przez dedykowane oprogramowanie CircuitCAM, na podstawie plików roboczych generowanych w formatach Excellon i Gerber w oprogramowaniu projektowym PCB. Program CircuitCAM odpowiada m.in. za dobór minimalnej szerokości odstępów

separacji w procesie frezowania oraz wykonuje trasowanie projektu z użyciem odpowiednich frezów. W przypadku projektu, gdzie wymagana liczba narzędzi jest większa niż 10 sztuk, oprogramowanie frezarki w odpowiednim momencie w trakcie frezowania płyty wysyła komunikat o konieczności wymiany narzędzi i umieszczenia ich w odpowiednich uchwytach. Ważnym czynnikiem wpływającym na jakość wytwarzanych płyt PCB jest testowe wstępne ustalenie szerokości ścieżki separującej wykonywanej fizycznie przez frez. Szerokość tę ustala się pokrętkiem regulacyjnym umieszczonym w głowicy roboczej. Zmiana położenia pokrętkła wpływa na głębokość wnikania frezu kalibracyjnego (frezu o najmniejszej wymaganej w danym projekcie średnicy) w laminat. Ocenę szerokości ścieżki przeprowadza się przy pomocy dedykowanego mikroskopu z podziałką, po wykonaniu frezowanej linii testowej (o długości około 1 cm). Wysokość zawieszenia frezu w głowicy jest właściwa wówczas, gdy uzyskana szerokość separacji jest równa nominalnej średnicy frezu. Główne kolejno następujące po sobie etapy procesu frezowania dla projektów jednostronnych płyt PCB to zaznaczanie miejsc otworów (*MarkingDrills*), wiercenie otworów (*DrillingPlated*), frezowanie dolnej strony płytki PCB (*MillingBottom*) oraz wycinanie płytki z laminatu bazowego (*CuttingOutside*). Należy nadmienić, iż frezarka wyposażona jest w automatyczny odkurzacz, którego zadaniem jest zasysanie wiórów powstających w trakcie frezowania oraz wytwarzanie podciśnienia zapewniającego właściwy docisk laminatu bazowego, w którym wykonywana jest płytka drukowana, do podłoża stolika roboczego frezarki.

Technika mikroobróbki laserowej DW (*direct writing*) [3] i LDI-HDI (*laser direct imaging-high density interconnects*) [4, 5] zapewnia obecnie najwyższą rozdzielczość i upakowanie połączeń drukowanych (poniżej 100  $\mu\text{m}$ ). Jest wykorzystywana zarówno do bezpośredniego wykonywania połączeń drukowanych i usuwania miedzi w procesie ablacji laserowej [3], jak i pośredniego poprzez naświetlanie masek połączeń drukowanych w warstwach światłoczułych polimerów [4, 5], które osadza się na laminatach drukowanych. O przydatności lasera do mikroobróbki materiałów w procesie ablacji decyduje długość fali generowanego promieniowania optycznego oraz jego moc, w szczególności zaś energia impulsów oraz czas trwania tych impulsów [6]. Istotne jest, aby w trakcie obróbki nie dochodziło do nadmiernego wzrostu temperatury w obszarze HAZ (*heat affected zone*) operującej wiązki, a to możliwe jest do uzyskania z wykorzystaniem impulsów o czasach trwania na poziomie nanosekund lub mniejszych [3, 6]. Do obróbki laminatów epoksydowo-szkłanych powleczonych miedzią, stosowanych do wytwarzania obwodów drukowanych, najbardziej przydatne są lasery UV (pozwalają zarówno na naświetlanie masek, usuwanie miedzi, jak i wykonywanie otworów i cięcie płytek PCB) [3-5, 7]. Z kolei, do obróbki cienkich warstw miedzi mogą być stosowane lasery pracujące na długości fali nie większej niż 1,064  $\mu\text{m}$  (np. lasery neodymowe lub światłowodowe). Na rynku oferowane są urządzenia laserowe dedykowane wyłącznie do mikroobróbki laserowej prototypowych PCB. Przykładem są produkty firmy LPKF zawierające laserowe źródła promieniowania UV [8].

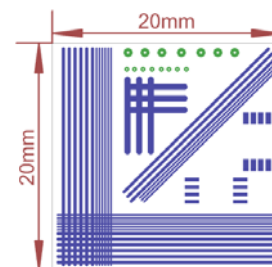
Na wyposażeniu jednego z laboratoriów UMG znajduje się uniwersalne urządzenie laserowe Speedy100 Flex firmy Trotec [9], dedykowane do cięcia i grawerowania różnych materiałów, w tym m.in. akrylu, szkła, drewna oraz cienkich warstw metali. Urządzenie zawiera dwa źródła promieniowania laserowego. Jednym z nich jest laser światłowodowy domieszkowany neodymem pracujący na długości fali 1,064  $\mu\text{m}$ , o mocy optycznej równej 30 W. Z

kolei drugi laser – laser CO<sub>2</sub> o mocy optycznej 60 W, pracuje na długości fali 10,6  $\mu\text{m}$ . W rozważanym ploterze laser światłowodowy umożliwia zatem obróbkę obwodu drukowanego w zakresie wykonania maski połączeń w warstwie miedzi, jednakże bez możliwości wykonania otworów i wycięcia płytki. Częstotliwość impulsów tego lasera mieści się w zakresie od 20 kHz do 80 kHz, a prędkość przesuwu wynosi maksymalnie 2 m/s. Niestety producent urządzenia nie podaje czasu trwania impulsów oraz energii impulsów, jednakże jak wynika z przeglądu not katalogowych laserów światłowodowych o mocy 30 W oferowanych na rynku, czas trwania impulsów laserowych mieści się zazwyczaj w przedziale od 2 do 200 ns, częstotliwość impulsów zawiera się w zakresie od 20 do 1000 kHz, natomiast maksymalna energia impulsów obejmuje zakres od 600 do 1500  $\mu\text{J}$ .

Do głównych parametrów lasera, których wartości są ustalane w oprogramowaniu sterującym JobControl należy: moc lasera – wyrażona w [%] mocy znamionowej, prędkość posuwu głowicy roboczej – wyrażona w [%] posuwu znamionowego oraz częstotliwość impulsowania wyrażona w [Hz]. Przy obróbce metali w głowicy roboczej urządzenia montowane są soczewki o ogniskowych 2,85" lub 5". Zadaniem soczewki jest przewężenie wiązki laserowej, tak aby operowała ona na materiale roboczym w postaci plamki o bardzo małej średnicy. Proces wykonywania połączeń drukowanych wykorzystuje technikę rastrową [4], tj. operowanie na warstwie miedzi linia po linii, z określoną maksymalną rozdzielczością wyrażoną w DPI (*dots per inch*) równą 1000. Podana wartość oznacza, że średnica wiązki laserowej w płaszczyźnie przewężenia musi być co najmniej równa lub większa od około 25  $\mu\text{m}$ . W celu wykonania płytki PCB w rozważanym urządzeniu, zaprojektowany obwód drukowany należy przekonwertować w środowisku CAD, z rozdzielczością nie mniejszą niż 1000 DPI, do pliku graficznego (np. w formacie \*.png) w taki sposób, aby zawierał biało-czarny obraz połączeń drukowanych, przy czym usuwany obszar miedzi powinien odpowiadać barwie czarnej. Następnie, plik ten jest importowany do programu obsługującego pliki graficzne (np. Inkscape lub CorelDraw), skąd jest przesyłany do oprogramowania sterującego ploterem. Kreślenie obrazu płytki PCB jest procesem powtarzanym wielokrotnie, aż do momentu usunięcia niepożądanych obszarów miedzi.

#### Projekt wzoru testowego obwodu drukowanego

Rysunek 1 przedstawia maskę testowego wzoru zaprojektowanego do oceny możliwości trzech rozważanych w pracy technik.

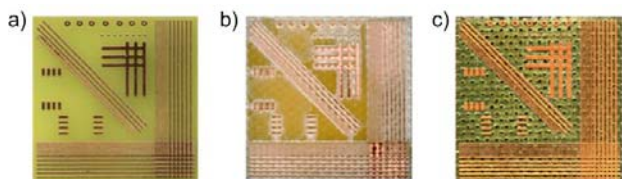


Rys.1. Wzór testowy wykonywany na płycie drukowanej

Zaprojektowany na dolnej stronie laminatu FR4 wzór zawiera zarówno ścieżki o szerokościach i odstępach między nimi różnych: 20, 10 oraz 5 mil (10 mil = 254  $\mu\text{m}$ ), jak i pola lutownicze o średnicy równej 30 i 15 mil, ze średnicą otworów równą odpowiednio 10 i 5 mil. Na płycie umieszczono także foot-print w dwóch wersjach dla układów scalonych w obudowie typu MSOP8.

## Ocena i analiza wykonanych PCB

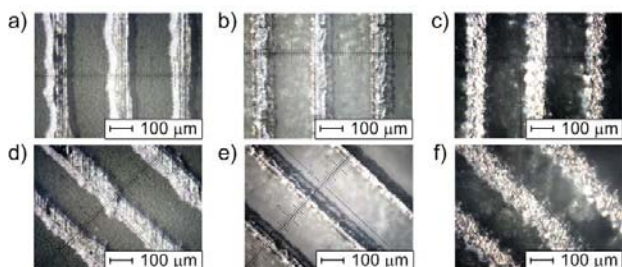
Na rysunku 2 pokazano obrazy płytek PCB wykonanych na laminacie FR4 z warstwą miedzi o grubości 35  $\mu\text{m}$ , z wykorzystaniem techniki fotochemicznej – FOT, frezowania – FREZ i mikroobróbki laserowej – LAS. Dokonując oceny wzrokowej należy stwierdzić, że rozważane w pracy techniki umożliwiły wytworzenie obwodu testowego.



Rys.2. Wzór testowy na płytce drukowanej: a – technika FOT, b – technika FREZ, c – technika LAS

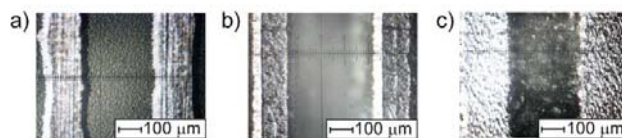
W przypadku metody fotochemicznej w odróżnieniu od pozostałych dwóch metod, powierzchnia laminatu nie posiada uszkodzeń. Podczas frezowania uszkodzenia powstają w efekcie zagłębienia się frezów w laminat, natomiast podczas obróbki laserowej – w efekcie oddziaływania promieniowania laserowego z żywicą i włóknami szklanymi stanowiącymi laminat FR4. Ze względu na wyższą wartość współczynnika absorpcji promieniowania żywicy epoksydowej, w porównaniu do miedzi, dla  $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$  [7], po usunięciu warstwy metalizacji przy niepoprawnie dobranych parametrach lasera może dojść do uszkodzeń termicznych powierzchni laminatu. Należy podkreślić, iż uszkodzenia laminatu mogą w efekcie skutkować rozwarstwieniem się wykonanych połączeń i podłoża. W przypadku mikroobróbki laserowej z użyciem urządzenia rozważanego w pracy najlepsze jakościowo płytki PCB uzyskuje się dla następujących parametrów lasera: moc – 40%, prędkość przesuwu – 30%, częstotliwość impulsów – od 20 do 30 kHz.

Dokładną ocenę jakości wykonanych płytek i możliwości rozważanych technik przeprowadzono w oparciu o inspekcję optyczną z wykorzystaniem mikroskopu XC-100L (powiększenie  $\times 100$ ) oraz kamery cyfrowej DBK31AU03 z obiektywem o ogniskowej równej 16 mm. Na rysunku 3 pokazano pionowe i ukośne ścieżki drukowane o szerokości 5 mil, natomiast na rysunku 4 ścieżki pionowe o szerokości 10 mil. Jak można zaobserwować na rysunkach, w metodzie FREZ otrzymuje się regularne proste krawędzie elementów drukowanych. Z kolei, najmniejszą regularnością charakteryzują się ścieżki wytworzone metodą FOT, co wynika z efektu podtrawiania ścieżek w kąpeli trawiącej.



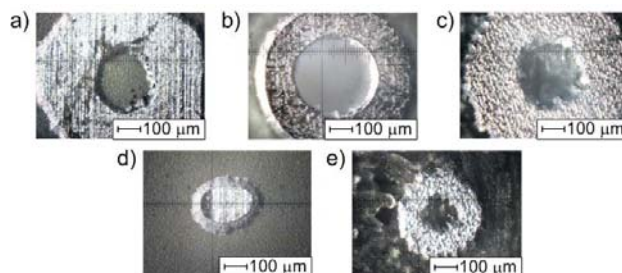
Rys.3. Ścieżki o szerokości 5 mil: a, d – technika FOT; b, e – technika FREZ; c, f – technika LAS

Należy podkreślić, iż niezależnie od techniki szerokości ścieżek są mniejsze niż przyjęte w projekcie, natomiast odstępy pomiędzy ścieżkami są większe niż w projekcie, przy czym najwyższą zgodnością z wartościami projektowymi cechują się ścieżki uzyskane techniką LAS (dotyczy to także ścieżek poziomych).



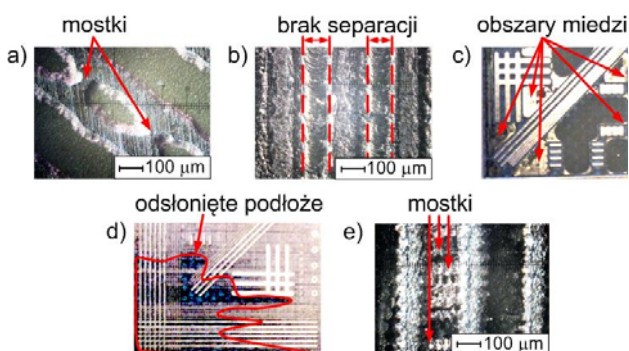
Rys.4. Ścieżki o szerokości 10 mil: a – technika FOT, b – technika FREZ, c – technika LAS

Wysoką rozdzielczość i dokładność obróbki laserowej potwierdza rysunek 5. Jak widać na rysunku, tylko ta technika umożliwiła wykonanie pól o średnicy 15 mil. W przypadku metody FOT i FREZ poprawnie wytworzono wyłącznie pola o średnicy 30 mil.



Rys.5. Pola o średnicy 30 mil i 15 mil: a, d – technika FOT; b – technika FREZ; c, e – technika LAS

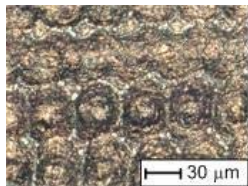
Na rysunku 6 pokazano wybrane defekty, które wystąpiły na płytkach PCB w trakcie testów. W przypadku techniki FOT pomiędzy zbyt blisko umieszczonymi ścieżkami mogą pojawić się mostki łączące ścieżki – rysunek 6a. Taki defekt wynika z niedoświetlenia fotopolimeru lub niskiej jakości fotoszablonu. Z kolei, w trakcie frezowania w pewnych obszarach płyty mogą pojawić się miejsca, w których miedź nie jest poprawnie usuwana. W efekcie, ścieżki nie są separowane – rysunek 6b lub na płytce pozostają niepożądane fragmenty warstwy miedzi – rysunek 6c. Wady te wynikają z niedokładności pozycjonowania frezów w głowicy roboczej i ustalaniu wzorcowej ścieżki separującej oraz nierówności powierzchni laminatu.



Rys.6. Defekty na płytkach PCB: a) mostki pomiędzy ścieżkami – technika FOT; b), c) płytkie wnikanie frezów – technika FREZ; d) nierównomierne usuwanie miedzi oraz e) mostki pomiędzy ścieżkami – technika LAS

W przypadku obróbki laserowej jednym z defektów może być nierównomierne usuwanie miedzi – rysunek 6d. Tego typu wada powstaje przy użyciu w ploterze soczewki o ogniskowej 2,85" dla płyt bazowych, których powierzchnia nie jest wystarczająco płaska. Innym defektem mogą być mostki pomiędzy ścieżkami – rysunek 6e. W celu ich uniknięcia, obraz połączeń należy wykonywać metodą przeplotu, polegającą na użyciu dwóch różnych częstotliwości impulsowania i przesuwaniu obrazu w osi „Y”

plotera (w górę i w dół) o odległość równą średnicy przewężenia wiązki laserowej wynoszącej około 30  $\mu\text{m}$ , dla kolejnych przejść głowicy roboczej. Wartość przesuwu wynika z rysunku 7 (uzyskanego mikroskopem VHX-6000 Keyence), na którym w warstwie miedzi widoczne są sąsiadujące ze sobą kraterami uderzeniowymi wiązki laserowej.



Rys.7. Warstwa miedzi z kraterami uderzeniowymi wiązki laserowej dla soczewki o ogniskowej 5"

### Wnioski

W pracy wykazano, iż wykonanie w warunkach laboratoryjnych płytek PCB z dużą gęstością upakowania ścieżek drukowanych, tj. odległościach między nimi rzędu 130  $\mu\text{m}$  i szerokościach równych około 100  $\mu\text{m}$ , jest możliwe zarówno z użyciem techniki frezowania i mikroobróbki laserowej z promieniowaniem z zakresu bliskiej podczerwieni, jak i techniki fotochemicznej. Z kolei, w przypadku pól lutowniczych dla elementów przewlekanych ich średnica nie powinna być mniejsza od około 750  $\mu\text{m}$ .

**Autor:** dr inż. Jacek Dąbrowski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: [j.dabrowski@we.umg.edu.pl](mailto:j.dabrowski@we.umg.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Górecki K., Zarębski J., Bisewski D., Dąbrowski J., Jasicki P., Laboratorium projektowania i konstrukcji urządzeń elektronicznych, *Wiadomości elektrotechniczne*, 80 (2012), nr 10, 34-36
- [2] <http://www.lpkfusa.com/datasheets/prototyping/s62.pdf>
- [3] Tański M., Barbucha R., Janke M., Garasz K., Kocik M., Mizeraczyk J., Zastosowanie nanosekundowej mikroobróbki laserowej do wykonywania metalowych elementów urządzeń MEMS, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 11a, 211-213
- [4] Mizeraczyk J., Tański M., Barbucha R., Kocik M., Urządzenie laserowe do naświetlania masek przeciwłutowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 9, 118-121
- [5] Barbucha R., Janke M., Garasz K., Kocik M., Tański M., Mizeraczyk J., Urządzenie laserowe do bezpośredniego naświetlania gęsto upakowanych schematów obwodów elektrycznych na płytkach drukowanych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 11a, 156-159
- [6] Barbucha R., Mikroobróbka laserowa metali, *STAL Metale & Nowe Technologie*, nr 7-8 (2018), 6-7
- [7] <https://www.industrial-lasers.com/index.html>, Stafford S., Printed circuit board processing with UV lasers – Applications from prototyping to production, *Industrial Laser Solutions*, 18/03/2014
- [8] <https://www.lpkf.com/en/>
- [9] <https://www.troteclaser.com/en/laser-machines/laser-engravers-speedy-series/>