

Płytki drukowane - zasady projektowania i wykonanie w warunkach amatorskich

Jeszcze 30 lat temu było to możliwe, dzisiaj już na pewno nie. Nawet najbardziej amatorskie z amatorskich konstrukcji elektronicznych muszą być wykonane na płytkach drukowanych. Ich wykonanie zawsze sprawiało wiele kłopotów.

W wykonanie w profesjonalnym zakładzie pojedynczych płytek drukowanych jest kosztowne; często cena przewyższa wartość pozostałych elementów. Pozostaje więc samodzielne wykonanie płytki. Aby uniknąć sytuacji, że układ działa poprawnie jedynie w próbnej wersji na płytce montażowej, a na płytce drukowanej uruchomienie jest bardzo kłopotliwe, należy w czasie projektowania płytki drukowanej przestrzegać pewnych reguł.

Dla układów m.cz.

I tak, jeżeli układ będzie pracował w zakresie małych częstotliwości, podstawowymi parametrami obwodów drukowanych będą: rezystancja ścieżek, dopuszczalna obciążalność prądowa ścieżek oraz odporność izolacji na przebicie. W układach analogowych, szczególnie małosygnałowych, rezystancja ścieżek może mieć istotny wpływ na pracę całego

układu. Zależność rezystancji ścieżki przewodzącej od jej szerokości dla trzech różnych temperatur przedstawiono na rys. 1. Z rezystancją ścieżki jest ściśle związana jej obciążalność prądowa. Większość ścieżek na płytkach przewodzi bardzo małe prądy, dlatego o szerokości ścieżek decydują głównie możliwości ich wykonania, jednak w układach zasilających lub stopniach mocy prądy mogą osiągać znaczne wartości. Aby nie dopuścić do nagrzewania ścieżek należy nie przekraczać dopuszczalnego ich obciążenia, które wynosi 3 A na 1 mm szerokości ścieżki. Zaleca się jednak prowadzenie maksymalnie szerokich ścieżek.

Trzecim istotnym parametrem jest wytrzymałość na przebicie. Układy elektroniczne są zwykle zasilane niewielkimi napięciami, dlatego odległości między ścieżkami wynikają raczej ze względów technologicznych niż z wytrzymałości na przebicie. Typowo, dla napięć nie przekraczających 50 V odległość powinna być większa niż 0,5 mm. Często zachodzi jednak potrzeba prowadzenia ścieżek będących pod bezpośrednim napięciem sieci energetycznej 220 V. W takim przypadku ścieżki muszą być rozdzielone przerwą przynajmniej 6 mm.

Dla układów w.cz.

W urządzeniach pracujących przy większych częstotliwościach sytuacja nieco się komplikuje. Połączenia między elementami o długości porównywalnej z długościami fal tworzących widmo sygnału należy traktować jako linie przesyłowe o określonych parametrach. Przy projektowaniu urządzenia cyfrowego TTL trzeba pamiętać, że czasy propagacji bramek wynoszą około 3 ns i należy się liczyć z opóźnieniami wprowadzanymi przez długie ścieżki. Opóźnienia te można obliczyć z zależności:

$$t = \sqrt{LC}$$

Dla laminatu epoksydowo-szklanego grubości 1,5 mm czasy propagacji ścieżek wynoszą około 60 ps/cm, czyli ścieżka o długości 20 cm wprowadzi opóźnienie 1,2 ns! Dla małych odległości można przyjąć, że połączenie przedstawia skupioną pojemność obciążającą źródło. Traktując ścieżkę jak kondensator płaski, można wyznaczyć jej pojemność z zależności:

$$C = 0,177 \cdot \frac{\epsilon_r s}{g} \text{ [pF / cm]}$$

gdzie:

ϵ_r – stała dielektryczna (dla laminatu epoksydowo-szklanego wynosi około 5),

s – szerokość ścieżki,

g – grubość warstwy izolacyjnej.

Przykładowo, dla ścieżki o szerokości 1 mm i grubości płytki 1,5 mm otrzymujemy $C = 0,6$ pF/cm. W praktyce pojemność będzie nieznacznie różnić się od obliczonej, gdyż podany wzór nie uwzględnia efektów brzegowych. Podobnie jak pojemność, można wyliczyć indukcyjność ścieżki z zależności określającej indukcyjność przewodu nad płaszczyzną masy:

$$L = 2 \ln \left(\frac{4g}{0,567s + 0,67w} \right) \text{ [nH / cm]}$$

gdzie:

s – szerokość ścieżki,

w – grubość pokrycia miedzianego,

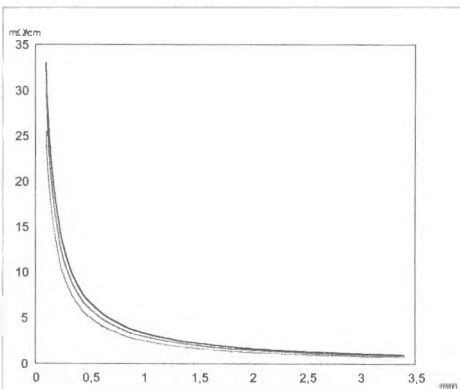
g – grubość warstwy izolacyjnej.

Wzory są prawdziwe dla płytek dwustronnych, w których jedna ze stron stanowi masę. Jest to stosowane w układach dla większych częstotliwości, gdzie istotne jest zachowanie jednorodności parametrów linii przesyłowych.

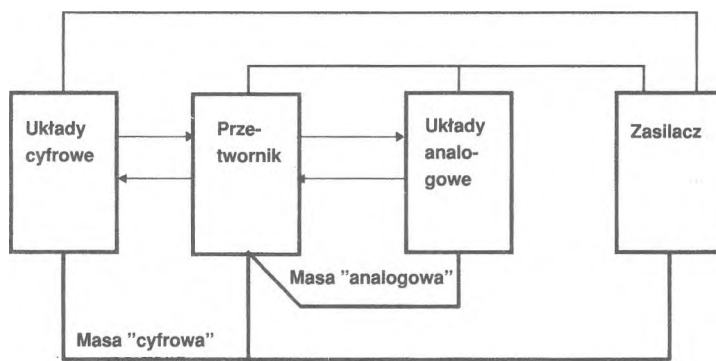
Na podstawie powyższych rozważań należy wysnuć wniosek, że połączenia trzeba prowadzić możliwie krótkimi i szerokimi ścieżkami.

Rozprowadzanie masy

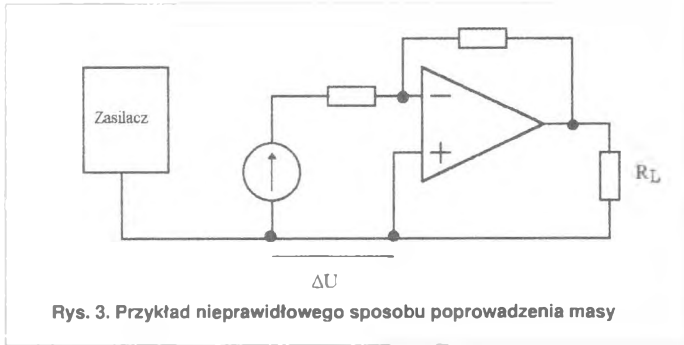
Szczególną uwagę trzeba zwracać przy projektowaniu ścieżek stanowiących masę w układach małosygnałowych. W urządzeniach, w których występują zarówno sygnały analogowe jak i cyfrowe, rozdzielanie przepływu prądów powrotnych jest koniecznością. Czułe wejścia układów analogowych mogą zo-



Rys. 1. Rezystancja ścieżki miedzianej o długości 1 cm i grubości 70 μm w zależności od jej szerokości



Rys. 2. Prawidłowy sposób łączenia mas w układach analogowo-cyfrowych



Rys. 3. Przykład nieprawidłowego sposobu poprowadzenia masy

stać zakłócone przez prądy płynące w przewodach masy. Na przykład, przepływ prądu 100 mA przez przewód masy o rezystancji 0,1 Ω wywoła spadek 10 mV. Jeżeli w urządzeniu zastosowano 12-bitowy przetwornik a/c, w którym bit najmniej znaczący odpowiada 2,5 mV, to z powodu złego prowadzenia masy rzeczywista rozdzielczość przetwornika zostanie zredukowana do 10 bitów. Prawidłowy sposób prowadzenia masy w takim przypadku przedstawiono na rys. 2.

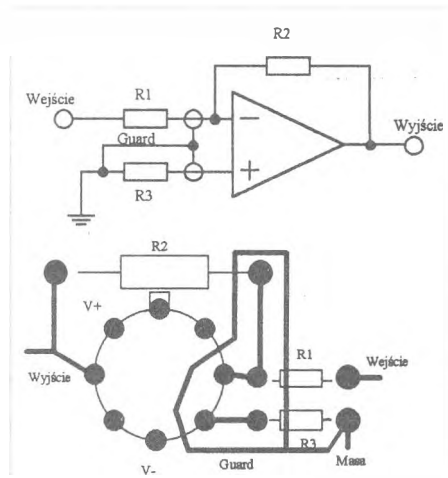
W układach analogowych o dużej czułości należy dbać o rozdzielenie mas wejściowych i wyjściowych. Niewłaściwe prowadzenie ścieżek może być przyczyną powstawania niedokładności lub wzbudzeń. W celu eliminacji tych zjawisk należy prześledzić drogi przepływu prądów w urządzeniu. Na rys. 3 przedstawiono model wzmacniacza z niewłaściwie poprowadzoną ścieżką masy. Prąd obciążenia płynący przez RL musi powrócić do zasilacza przez ścieżkę zasilania. Na odcinku między wejściem nieodwracającym wzmacniacza a miejscem dołączenia źródła sygnału wywoła on spadek napięcia ΔU . Napięcie to wpłynie na różnicę potencjałów między wejściami wzmacniacza, wprowadzając zakłócenie. Przykładowo, przy maksymalnym napięciu wyjściowym wzmacniacza rzędu 20 V, przez obciążenie $R_L = 100 \Omega$ popłynie prąd 200 mA. Zakładając wzmocnienie układu 60 dB (1000 V/V), napięcie potrzebne do pełnegoysterowania wzmacniacza będzie równe 2 mV. Rezystancja pięciocentymetrowej ścieżki o szerokości 1,5 mm wyniesie 8,5 mΩ, więc $\Delta U = 1,7 \text{ mV}$, czyli napięcie sygnału zakłócającego będzie porównywalne z sygnałem sterującym. Na rys. 4 przedstawiono, jak należy połączyć masy, aby uniknąć wymienionych kłopotów. W rzeczywistości zagadnienie jest znacznie bardziej złożone, gdyż źródło sterujące również wprowadza pewne spadki napięcia, jednak nie mające tak dużego wpływu na pracę układu.

W urządzeniach o szczególnie małych prądach wejściowych (rzędu nA i mniej) nabiera znaczenia rezystancja dielektryka płytki drukowanej. Również zanieczyszczenia typu kurz, tłuszcz itp. znajdujące się na płytce mogą niekorzystnie wpływać na pracę układu. Dotyczy to szczególnie wzmacniaczy z wejściami typu FET i MOSFET. W takiej sytuacji należy zastosować dodatkową pętlę ekranującą wejścia wzmacniacza tzw. "guard". Przedstawiono to na rys. 5. Ponieważ różnica potencjałów między wejściami wzmacniacza a masą jest bliska ze-

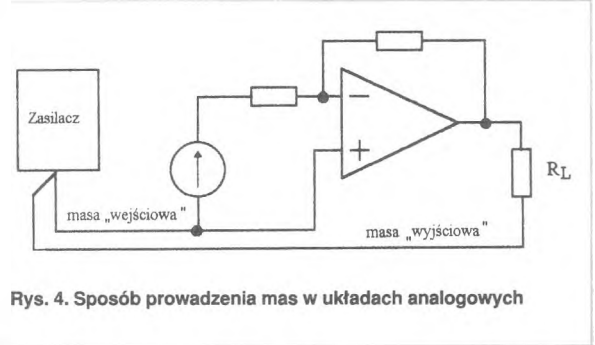
ra, więc szkodliwe prądy jakie mogą tu popłynąć zwykle są pomijalne. Natomiast prądy upływu pochodzące od punktów zasilania oraz wyjścia zostaną odprowadzone do masy.

Wymagania dotyczące wykonania

Przy projektowaniu należy oczywiście uwzględnić także odpowiednie rozmieszczenie elementów. Każda płytka musi być dostosowana do warunków jakie panują w danym urządzeniu, szczególnie do możliwości jej naprawy. Nie można na przykład umieszczać rezystorów nad układem scalonym, gdyż w przypadku jego uszkodzenia, wymiana będzie bardzo utrudniona. Elementy należy rozmieszczać na płytce tak, aby były one równoległe do krawędzi płytki i nie pokrywały się wzajemnie. Projektując płytkę drukowaną dwustronną bez metalizacji otworów trzeba także pamiętać, że nie będzie można lutować punktów pod niektórymi podzespołami, np. kondensatorami do pionowego montażu, czy pod podstawkami układów scalonych. Liczbę przelotek należy także ograniczyć do minimum, pozostawiając tylko te naprawy konieczne (rys. 6). Każdy projekt trzeba pod tym względem dokładnie sprawdzić. Płytki generowane przez programy komputerowe na podstawie listy połączeń są szczególnie często obarczone tego typu niedogodnościami.



Rys. 5. Sposób prowadzenia ścieżki ekranującej typu "guard" dla wzmacniacza w obudowie TO-99



Rys. 4. Sposób prowadzenia mas w układach analogowych

Amatorskie metody wykonywania płytek drukowanych

Najpopularniejszym sposobem na uzyskanie niezłej jakości płytki drukowanej jest namalowanie mozaiki ścieżek flamastrem kwasoodpornym lub lakierem do paznokci na laminacie pokrytym warstwą miedzi. Jest to dość trudne i wymagające pewnej wprawy, lecz należy zdać sobie sprawę, że nie ma łatwego sposobu.

Pierwszą czynnością po przygotowaniu projektu jest wycięcie płytki o odpowiednim kształcie i oszlifowanie jej krawędzi. Następnie należy nakleić kopię (np. ksero) projektu na płytkę przezroczystą taśmą klejącą i zaznaczyć punktem miejsca, w których będą znajdowały się otwory. Trzeba uważać, żeby nie przeoczył żadnego punktu. Wiercić najlepiej specjalną wiertarką do płytek drukowanych, w ostateczności – zwykłą wiertarką elektryczną na statywie, zaopatrzoną w wiertło średnicy 0,8÷1 mm. W przypadku trudności z zamocowaniem takiego cienkiego wiertła można je okrócić miedzianym drutem średnicy 0,5÷0,8 mm. Płytkę z otworami należy dokładnie oczyścić papierem ściernym nr 200, uważając, aby zniknęły wszystkie "kotnierze" wokół otworów, a płytka stała się błyszcząca, pozbawiona tlenków. Przed malowaniem powierzchni płytki należy odtłuścić, np. płynem do mycia naczyń. Na tak przygotowaną płytkę można nanieść lakier. Przed malowaniem ścieżek można wykonać punkty lutownicze za pomocą zaostrej zapałki lub wykałaczki. Ścieżki malujemy cienkim pędzelkiem lub stalówką. Ważne jest, aby lakier miał odpowiednią gęstość. Nie może pozostawiać "nitek" i nie może też być zbyt rzadki, gdyż nie wytrzyma agresji środka trawiącego. Po namalowaniu wszystkich ścieżek i wysuszeniu płytki można przystąpić do trawienia.

Do rozpuszczania wolnych od lakieru części płytki najczęściej stosowany jest trójchlorek żelaza ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Do kuwety fotograficznej lub innego płaskiego naczynia należy nalać ciepłej wody, następnie wsypać kryształki chlorku i mieszając doprowadzić do ich całkowitego rozpuszczenia. Typowe stężenie to 200 g trójchorku na 1 litr wody. W tak przygotowanym roztworze należy zanurzyć płytkę na około 5 minut, delikatnie ją poruszając. Do trawienia można także zastosować następującą mieszankę: 200 ml stężonego kwasu solnego (HCl)

200 ml perhydrolu technicznego (H_2O_2)
600 ml wody.

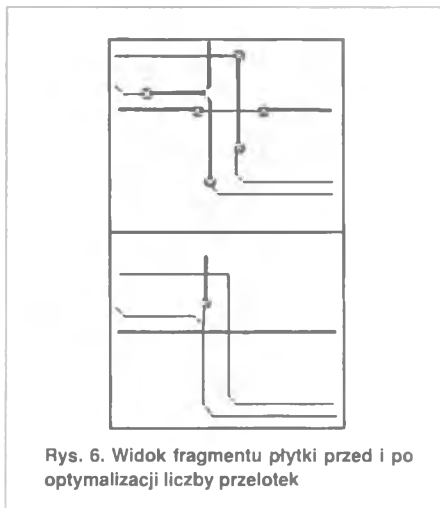
Podczas przygotowywania roztworu należy szczególnie chronić ręce i oczy. Plamy powstałe w wyniku rozlania kwasu lub chlorku są praktycznie nieusuwalne. Kwas trzeba wlewać powoli do wody i perhydrolu. Po zmieszaniu roztwór nie jest już tak niebezpieczny dla rąk, jak każdy z odczynników osobno. Do poruszania i wyjmowania płytki nie można stosować przedmiotów metalowych, gdyż ulegną zniszczeniu i osłabią roztwór. Podczas trawienia w kwasie wydziela się dużo trujących gazów, m.in. chlor, dlatego proces należy przeprowadzać w dobrze przewietrzonym miejscu. Czas potrzebny do całkowitego wytrawienia płytki jest zależny od stężenia roztworu, wielkości płytki itp. i nie powinien przekraczać 15 min. Dłuższe czasy trawienia świadczą o zużyciu wytrawiacza. Proces trawienia nie może jednak przebiegać zbyt gwałtownie, gdyż grozi to "podtrawianiem" ścieżek. Roztwór chlorku można w pewnym stopniu zregenerować przez dolańcie odrobiny wrzącej wody. Gdy płytka jest całkowicie wytrawiona, należy ją wypłukać w wodzie i wysuszyć. Do usunięcia lakieru można użyć rozpuszczalnika nitro. Na końcu należy opisać płytkę tuszem i pokryć całość kałafonią rozpuszczoną w spirytusie w celu zabezpieczenia ścieżek przed utlenianiem. Można także zastosować FLUX 10 lub cynowanie jako środek chroniący przed skutkami korozji. Po wyschnięciu powłoki ochronnej można przystąpić do montażu elementów.

Opisana metoda wykonywania obwodów drukowanych ma sens przy wykonywaniu pojedynczych stosunkowo prostych płytek. Aby wykonać kilka identycznych płytek trzeba czynności malowania powtórzyć wielokrotnie. Używanie cienkich i równych ścieżek jest bardzo trudne. Nawet posługując się pisakiem kwasoodpornym przeprowadzenie połączenia między końcówkami układu scalonego jest prawie niemożliwe, nie mówiąc o elementach SMD.

Przy użyciu fotolakierów

Znacznie prościej można wykonać płytkę przy zastosowaniu fotolakierów. Jednym z nich jest produkt firmy Kontakt Chemie – Positiv 20. Przy użyciu tego lakieru płytka jest naświetlana z pozytywu (bez użycia negatywu). Umożliwia to wykorzystywanie projektów płytek publikowanych w różnych czasopiśmiech elektronicznych, w tym w ReAV. Również wydruki z programów do projektowania obwodów nadają się do bezpośredniego zastosowania. Dzięki metodzie naświetlania można uzyskać ostre krawędzie, cienkie ścieżki i możliwość łatwego powielania płytek.

Przed przystąpieniem do nałożenia emulsji światłoczułej należy płytkę dokładnie oczyścić. Jeżeli powierzchnia laminatu jest bardzo zanieczyszczona, należy wyszlifować ją delikatnie papierem ściernym nr 320 „na mokro”. Następnie, aby zapewnić absolutną czystość, należy umyć płytkę wykorzystując detergent (np. VIM, ATA) aż miedziana powłoka rozjaśni się, usunięte zostaną wszystkie tlenki i powierzchnia stanie się błyszcząca. Po całkowitym spłukaniu, trzeba płytkę wysuszyć między arkuszami absorbującego papieru, unikając przy tym dotyka-



Rys. 6. Widok fragmentu płytki przed i po optymalizacji liczby przelotek

nia palcami jej powierzchni. Do czyszczenia nie należy używać rozpuszczalników. Następnie można przystąpić do nakładania fotolakieru. Do tego celu nie jest wymagane zupełnie ciemne pomieszczenie, jednak należy to robić przy osłabionym oświetleniu, tzn. bez bezpośredniego działania słońca lub innych jasnych źródeł światła. Pożądane jest także pomieszczenie wolne od kurzu. Płytkę należy położyć w pozycji poziomej i skierować na nią "spray" z odległości ok. 30 cm. Pojemnik należy trzymać nieznacznie pochylony. Aby warstwa była równa, należy przesuwać strumień fotolakieru liniami serpentynowymi. Jest to ważne, gdyż grubsze miejsca będą wymagały dłuższego czasu naświetlania. Od momentu nałożenia fotolakieru, płytki nie można wystawiać na bezpośrednie działanie światła. Suszenie należy przeprowadzać w zupełnej ciemności. Lakier może być suszony w pokojowej temperaturze przez co najmniej 24 godziny, bezpieczniej jednak przyspieszyć ten proces wykorzystując suszarkę z termostatem. Temperaturę należy podnosić powoli, najwyżej do 70°C i pozostawić płytkę na około 20 min. U w a g a. Przekroczenie 70°C spowoduje uszkodzenie nałożonego fotolakieru.

Oryginalny układ musi być przygotowany jako kopia przedstawiająca rysunek pozytywowym w skali 1:1. Najlepiej jeśli rysunek zostanie przeniesiony na folię. Większość drukarek laserowych umożliwi wydruk bezpośrednio na folii. Istotną sprawą jest, aby była to folia wysokiej jakości i niezatłuszczona. W przeciwnym razie zaczernienie ścieżek jest niewystarczające. Również wykonanie kopii oryginału z drukarki igłowej na folii daje zadowalające rezultaty. W przypadku prostych płytek można mozaikę ścieżek namalować tuszem lub pisakiem na kalce technicznej. Kontakt-Chemie produkuje również preparat o nazwie Transparent 21. Zwiłżając nim obydwie strony papieru z wydrukiem ścieżek poprawia się przezroczystość pa-

piery dla zakresu UV. Należy odczekać około 15 min, aż emulsja wyschnie i projekt będzie podobny do zatłuszczonego papieru. Wykonany projekt należy położyć na płytce pokrytej fotolakierem, tak aby w miarę dokładnie do niej przylegał. Wskazane jest dociśnięcie szybą przepuszczającą ultrafiolet lub cienką płytką pleksi (rys. 7). Lampę UV należy ustawić w odległości 50 cm. Czas potrzebny do naświetlenia fotolakieru zależy od grubości warstwy oraz od intensywności i odległości źródła światła. Przy takiej odległości będzie wynosił 30 do 120 sekund.

U w a g a. Trzeba też uwzględnić czas potrzebny na rozgrzewanie się lampy. Ponieważ Positiv 20 PLUS jest czuły na promieniowanie UV, do naświetlania można użyć np. lampy do opalania, lampy typu LRR lub świetłówki stosowanej w kasownikach EPROMów i testerach banknotów lub innego źródła światła emitującego promienie ultrafioletowe, w ostateczności można wystawić na działanie słońca lub zwykłej żarówki. Należy wtedy skorygować czas naświetlania, wykonując kilka doświadczeń. Długość fali świetlnej powinna zawierać się w zakresie 360÷410 nm.

Kolejnym krokiem jest wywołanie. Musi być także przeprowadzone przy osłabionym świetle. Do wywoływania można stosować specjalne wywoływalce do fotolakierów dostępne w handlu (np. SENO 4007) lub wykonać odpowiedni roztwór samodzielnie. Do zrobienia wywoływalca potrzebne będzie 7 g sody kaustycznej (NaOH) na jeden litr chłodnej wody. Soda kaustyczna jest powszechnie dostępna w sklepach z chemikaliami. Sodę należy odważyć bardzo starannie, zachowując niezbędne środki ostrożności (soda kaustyczna jest silnie żrąca!). Naświetlone płytki należy zanurzyć w roztworze i delikatnie poruszać. Można także delikatnie pocierać szmatką lub gąbką. Po około 2 minutach obraz ścieżek będzie w pełni widoczny. Po wywołaniu płytkę należy natychmiast wypłukać w wodzie, gdyż fotoemulsja nie jest odporna na długotrwałe działanie sody kaustycznej. Proces trawienia jest identyczny jak w przypadku płytek malowanych pędzelkiem. Fotolakier jest odporny na działanie zarówno chlorku jak i kwasu. Po wytrawieniu należy jeszcze wywiercić otwory na końcówki elementów oraz otwory mocujące, opisać płytkę i zabezpieczyć przed utlenianiem.

Marek Feszczuk

