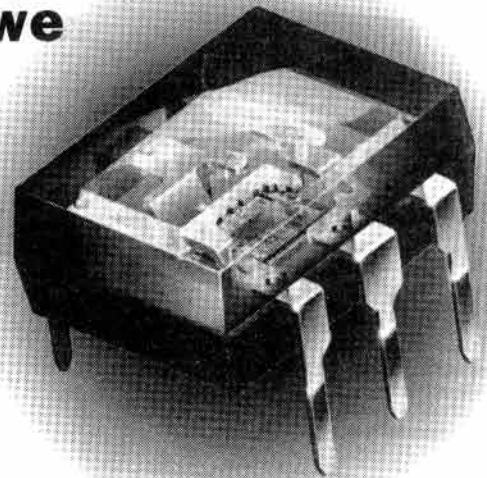


# Nowa generacja przekaźników

## Przekaźniki półprzewodnikowe ze sprzężeniem optycznym



### część 1

W serii artykułów opiszemy niezwykle interesujące przyrządy półprzewodnikowe - przekaźniki, w których elementem przełączającym jest tranzystor polowy lub tyrystor, sterowany poprzez złącze optyczne przez diodę sterującą typu LED. Ze względu na pewne podobieństwa omówimy także inny typ przyrządów półprzewodnikowych - sprzężacze optoelektroniczne.

### Wstęp

Przekaźniki elektromechaniczne będące jednymi z najstarszych elementów elektrycznych mają obecnie konkurentów - przekaźniki półprzewodnikowe (ang. *solid state relay*, SSR). W PP zestyki mechaniczne dające galwaniczne połączenie dwu obwodów zastąpiono tranzystorami MOSFET, fototyrystorami, tyrystorami lub triakami w zależności od przewidywanych zastosowań.

W odróżnieniu od przekaźników elektromechanicznych, gdzie elementem sterującym zestyki jest cewka, w PP stosuje się diody LED generujące światło, które poprzez transparentną żywicę silikonową sterują elementy przełączające.

PP pojawiły się na rynku na początku lat 70-tych, a wprowadziła je firma Theta J. z Walkfield, MA, USA, będąca oddziałem firmy CP Clare Int. Firma ta posiada patenty na podstawowe elementy konstrukcyjne PP. Na podstawie tych patentów PP produkowane są również przez inne firmy. Obecnie na świecie PP produkowane są przez wiele firm, przy czym najbardziej znanymi są: AT&T, Aromat, CP Clare, Coto Wabash, International

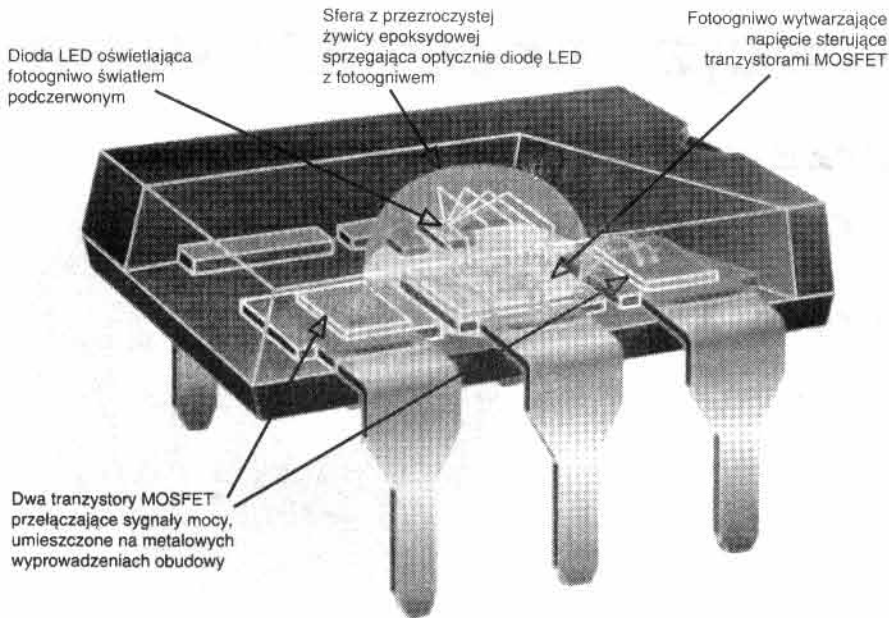
Rectifier, OPTO 22, Grayhill, Teledyne, Potter Brumfield z USA, NEC, Toshiba, Matsushita z Japonii. PP spotyka się pod różnymi nazwami w zależności od wytwórcy: Opto-Coupled, MOSFET Relays, OPTO-MOS Solid State Relays, Photo-MOS Relays, MOSFET SSR, Photovoltaic relay.

Wielkość sprzedaży PP na świecie wynosi 120mln USD, z czego 60mln USD w USA i 50mln USD w Europie. Wzrost sprzedaży PP na świecie wyniósł w roku 1994 około 7%. Na lata następne przewiduje się wzrost tempa sprzedaży PP do około 10% rocznie. W początkowym okresie swojego rozwoju w latach 70-tych i 80-tych PP były mało popularne ze względu na wysoką cenę, która z kolei była wyznaczona przez małą produkcję tych elementów półprzewodnikowych. W latach 90-tych nastąpił gwałtowny wzrost zapotrzebowania na PP, zwłaszcza dla zastosowań telekomunikacyjnych, co z kolei spowodowało znaczny spadek ich cen. Jednakże obecnie porównując ceny PP i przekaźników elektromechanicznych to ceny tych ostatnich są nadal niższe, przy czym można zaobserwować stałą tendencję malenia cen PP od kilku do kilkunastu procent rocznie. Najtańsze PP ma-

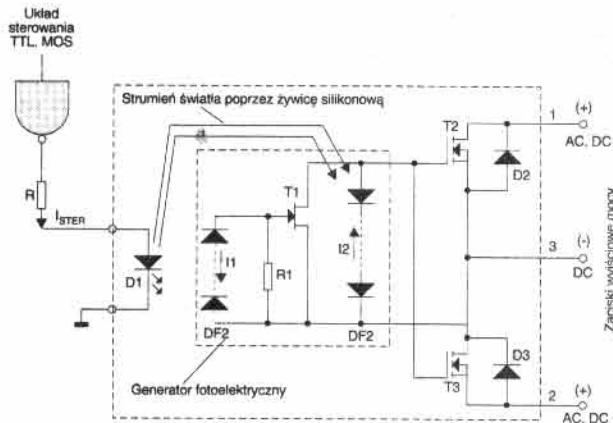
losygnalowe są około dwukrotnie droższe od ich odpowiedników elektromechanicznych. PP na duże prądy rzędu kilkunastu czy kilkudziesięciu A są od czterech do nawet 10 razy droższe od przekaźników elektromechanicznych. Ceny najtańszych PP małosygnalowych wynoszą od 1 do 1,5 USD (10 000 szt.), a ich odpowiedników elektromechanicznych od 0,5 do 0,7 USD. PP mocy na prądy rzędu 10A kosztują około 10 USD (1000szt.). Najdroższe PP mocy osiągają ceny do 100 USD. Spadek cen PP mocy jest spodziewany w najbliższych latach ze względu na ich rosnące zastosowanie w automatyce, w samochodach, a zwłaszcza w coraz bardziej nasyconym elektronką sprzęcie domowym. Tego zjawiska nie można zaobserwować w odniesieniu do przekaźników elektromechanicznych gdzie ceny są ustabilizowane, a polepszenie parametrów jest trudno uzyskać bez znacznego wzrostu ceny. Należy tu wyraźnie powiedzieć, że na całkowity koszt zastosowania PP czy przekaźników elektromechanicznych wpływa ilość dodatkowych elementów wymaganych do jego sterowania, wielkość zajmowanego przez nie miejsca w układzie, czas życia, spełnienie kilku funkcji jednocześnie, hermetyczność, od-

Tabela 1. Rodzaje PP i ich zastosowania

Parametr	Rodzaj	PP małej mocy	PP małej mocy specjalizowane	PP małej mocy prądu zmiennego	PP dużej mocy prądu zmiennego
Element przełączający		tranzystor MOSFET lub bipolarny	tranzystor MOSFET lub bipolarny	tyrystor, fototyrystor lub triak	tyrystor lub triak
Element sterujący		LED	LED	LED	LED
Izolacja optyczna		Tak 3750Vsk	Tak 3750Vsk	Tak 3750Vsk	3750Vsk
Parametry przełączania		400V, 400mA= 4A=	400V, 200mA=	600V, 10A=	600V, 100A=
Częstotliwość załączania		1...20kHz	1...10kHz	20...400Hz	50Hz (400Hz)
Częstotliwość przenoszonych sygnałów		0...100MHz	0...100MHz	20...400Hz	50Hz (400Hz)
Obudowy		DIL	DIL	DIL, SIL, specjalizowane	specjalizowane
Zastosowania		<ul style="list-style-type: none"> <li>telekomunikacja</li> <li>automatyka</li> <li>systemy alarmowe</li> <li>zbieranie danych</li> <li>przyrządy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>telekomunikacja</li> <li>systemy alarmowe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>automatyka</li> <li>systemy zanikania</li> <li>sterowanie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sterowanie mocy</li> <li>systemy zanikania</li> <li>automatyka</li> </ul>



Rys. 1. Budowa PP OPTO MOS firmy C. P. Clare. Obydwa tranzystory przełączające MOSFET są umieszczone na wyprowadzeniach obudowy DIL celem lepszego odprowadzenia ciepła.



Rys. 2. Obwód sterowania PP

porność na zakłócenia czy możliwość stosowania ich przy montażu powierzchniowym. Dopiero wzięcie pod uwagę tych wszystkich czynników mówi o całkowitym koszcie zastosowania przekaźnika.

Różne rodzaje PP i ich zastosowania są przedstawione w tabeli 1. Budowę PP przypominają sprzęgacze optoelektroniczne (SO), jednakże różnią się od nich zastosowaniem: zadaniem PP jest przełączanie na swym wyjściu sygnału mocy, a SO przenoszenie sygna-

łów analogowych lub cyfrowych między układem sterującym a układem wyjściowym poprzez układ sprzęgający. Stąd generalnie można stwierdzić, że najważniejszym ze względu na działanie i przeznaczenie w PP jest wyjściowy element przełączający, a w układzie SO jest zespół elementów sprzęgających obwód wejściowy i wyjściowy.

**PP małej mocy**

Zasada działania PP małej mocy zostanie omówiona na przykładzie klasycznego przekaźnika typu OPTO MOS firmy CP

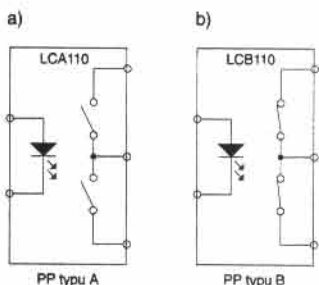
Clare, którego budowę wewnętrzną pokazuje rysunek 1.

Obwód sterowania PP tworzy dioda LED z arsenku galu emitująca światło podczerwone (rysunek 2). Takie diody mają największą sprawność energetyczną zwłaszcza przy małych prądach sterujących. Światło to, poprzez odpowiednio uformowaną sferę z transparentnej żywicy silikonowej pada na dwa fotoogniwa DF1 i DF2 generujące prądy fotoelektryczne  $I_1$  i  $I_2$ . Prąd  $I_1$  o wartości kilku amperów ładuje w czasie kilkuset  $\mu$ s pojemność bramka-źródło tranzystora polowego T1 z kanałem zubożonym. Tranzystor T1 przewodzi, gdy do jego bramki nie jest przyłożone napięcie, zwierając tym samym drugie źródło prądu fotoelektrycznego  $I_2$ . Pod wpływem wytworzonego prądu  $I_1$  tranzystor T1 zostaje zatkany, a źródło na diodach DF2 zaczyna ładować pojemności bramka-źródło dwu wyjściowych tranzystorów polowych MOSFET T2 i T3 z kanałem normalnie nieprzewodzącym. Tranzystory T2 i T3 nasycają się, a oporność ich kanału źródło-dren spada do kilku omów. W tym stanie mogą przewodzić sygnały mocy przyłożone do zacisków 1, 2 i 3.

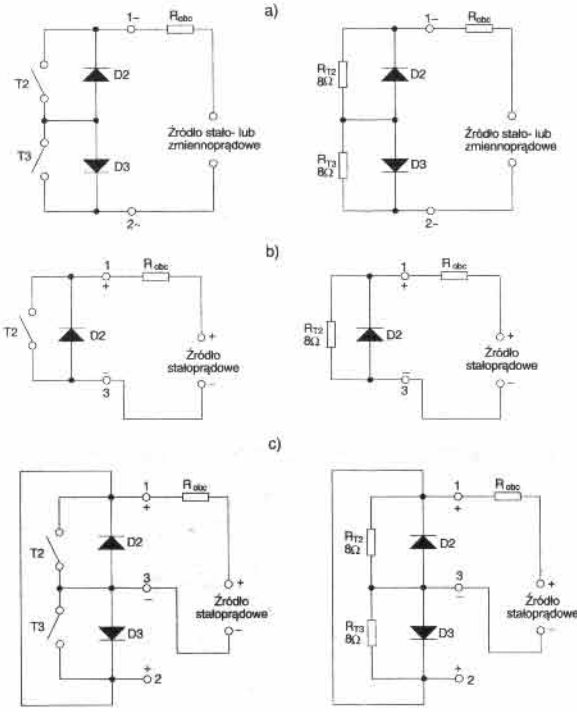
Gdy dioda wejściowa przestanie emitować światło, to pojemność bramka-źródło T1 rozładuje się poprzez rezystor R1, T1 zacznie przewodzić, tranzystory T2, T3 zatykają się i przekaźnik przestaje przewodzić, gdyż oporność kanałów tych tranzystorów wynosi wtedy setki  $M\Omega$ . Do pełnego wysterowania tranzystorów MOSFET potrzebne jest napięcie przyłożone między ich bramkę i źródło rzędu 5V. Generatory fotoelektryczne w PP wytwarzają napięcia rzędu 10V w celu zniwelowania szkodliwych wpływów temperaturowych na szybkość przełączania tranzystorów.

Opisany powyżej przekaźnik nazywa się normalnie otwartym lub typu A. Gdy zastępuje się tranzystory T2 i T3 z kanałem normalnie przewodzącym, to taki PP przewodzi w stanie niepobudzonym. Wysterowanie diody D1 spowoduje wg. opisanego sposobu zatkanie tranzystorów T2 i T3 i rozwarcie połączenia między zaciskami 1, 2, 3. Taki przekaźnik nazywa się przekaźnikiem ze stykami normalnie zwartymi lub typu B. W artykule pod pojęciem zestyków w PP będzie się uważało wyjściowe półprzewodnikowe elementy przełączające, a na schemacie zastępczym (rysunek 3) dla uproszczenia rysunku będą one miały takie same oznaczenia jak zestyki mechaniczne.

Ze względu na występowanie równoległych do tranzystorów mocy MOSFET T2 i T3 diod D2 i D3 uzyskiwanych automatycznie w procesie technologicznym, występują ograniczenia przy przewodzeniu sygnałów zmiennoprądowych między zaciskami 3 oraz 1 lub 2. W przypadku zatkania tranzystorów T2 lub T3 dodatnie połówki sygnałów byłyby przewodzone przez diody D2 i D3. To niekorzystne działanie diod D2 i D3 było przyczyną wprowadzenia dwóch tranzystorów przełączających MOSFET zamiast jednego. Dodatkowo dla przełączenia sygnałów zmiennoprądowych należy wykorzystywać tylko zaciski 1 i 2 (rys. 2). Dla przełączania sygnałów stałoprądowych wykorzystywać zaciski 1 i 2 lub 1-3 oraz 2-3. Można też, w celu zmniejszenia rezystancji zestyku stosować połączenia równoległe tranzystorów T2 i T3, łącząc z sobą zestyki 1 i 2. Należy wtedy jednak zachować polaryzację sygnałów, tak by uniknąć wpływu przewodzących diod bocznikujących tranzystory MOSFET (rys. 2 i 4). Impedancja przewodzącego zestyku w PP ma charakter czystej rezystancji. Napięcia termiczne generowane przez tranzystory MOSFET dzięki ich symetrycznej strukturze są bardzo małe i wynoszą do  $1\mu$ V. Ponieważ rezystancja przewodzącego PP ma wartość wyznaczoną przez rezystancję przewodzącego kanału tranzystora wyjściowego MOSFET, dąży się do zastosowania w nich tranzystorów o możliwie najmniejszej rezystancji przewodzenia, zachowując możliwie najwyższe dopuszczalne napięcia w stanie nieprzewodzącym. Są to dwa postulaty razem trudne do osiągnięcia. Niską rezystancję w stanie przewodzenia tranzystorów MOSFET w PP uzyskuje się przez stosowanie odpowiedniego domieszekowania krzemu, jednakże powoduje to obniżenie napięcia przebicia kanału źródło-dren w stanie nieprzewodzącym. Inną metodą jest zwiększanie wymiarów struktury tranzystora MOSFET. W tym przypadku napięcie przebicia nie maleje ze wzrostem wymiarów, rosną natomiast pojemności bramka-źródło oraz źródło-dren, co powoduje

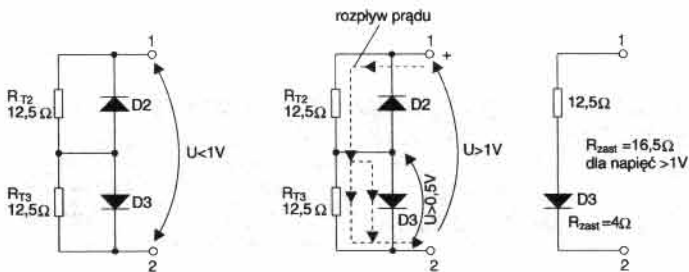


Rys. 3. Najczęściej spotykane konfiguracje PP



Rys. 4. Sposoby łączenia wyjść PP

zmniejszenie szybkości działania PP. Jednym z kierunków rozwoju PP jest dążenie do uzyskania możliwie małej rezystancji przewodzącego zestyku przy możliwie dużym napięciu dopuszczalnym w stanie rozwarcia. W PP mających dopuszczalne napięcie na nieprzewodzących zestykach rzędu 400V spotyka się rezystancję zestyków rzędu 0,2Ω napięcie to wynosi tylko 60V. Powtarzalność wartości rezystancji przewodzenia uzyskiwanych w PP pokazuje wykres słupkowy rozkładu wartości rezystancji w partii 40 sztuk (rys. 7d). Zazwyczaj uzyskuje się rozrzut wartości tej rezystancji do 10%. Charakterystyka prądowo-napięciowa PP ma charakter liniowy ze względu na rezystancyjne charakter kanału tranzystorów wyjściowych MOSFET (rys. 5). Jest ona jednakowa dla napięć dodatnich i ujemnych. Na charakterystyce występuje symetryczne załamanie wynikłe z obecności diod D2 i D3. W momencie gdy zaczyna przewodzić dioda, równoległa do rezystancji kanału tranzystora MOSFET, następuje zmniejszenie wypadkowej rezystancji tego umownego zestyku PP. Ten efekt nazywa się efektem diodowym w PP. Uzyskuje się przez to korzystne, ponad dwukrotne zmniejszenie rezystancji przewodzenia bez zmiany dopuszczalnego napięcia przebicia nieprzewodzącego zestyku.



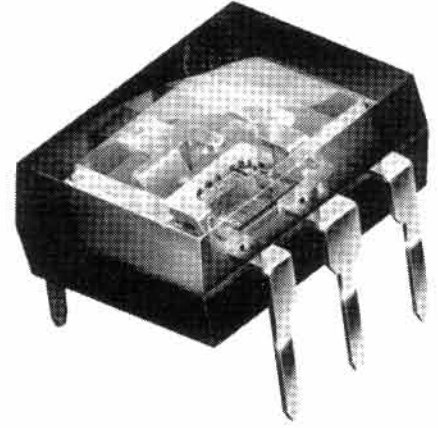
Rys. 5. Schematy zastępcze stopni wyjściowych PP

Dla napięć w kierunku przewodzenia mniejszych niż 1V, diody D2 lub D3 nie przewiodzą, stąd rezystancja zestyku wynosi 25Ω (rys. 5c). Po przekroczeniu napięcia 1V rezystancja zestyku maleje ze względu na bocznikowanie dodatkową rezystancją przewodzącej diody i charakterystyka ma inne nachylenie. Rezystancja zestyków PP czyli rezystancja przewodzącego kanału tranzystora MOSFET jest stała w czasie i nie zależy od czasu życia i ilości dokonanych połączeń. Nie występują tu również drgania i odbicia zestyków, tak charakterystyczne dla przełączników mechanicznych.

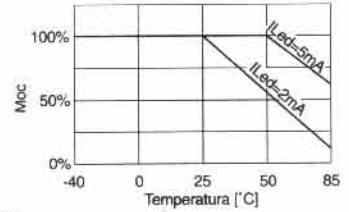
Ponieważ zestyki PP mają kilkoumową rezystancję, w czasie przewodzenia sygnałów wydziela się na nich moc, która w postaci wydzielonego ciepła wpływa niekorzystnie na parametry przyrządu. Problem wydzielania ciepła, odprowadzenia ciepła ze struktur tranzystorów MOSFET i przeciążenia zestyków są jednymi

z najważniejszych w konstrukcji PP. Ich rozwiązanie wyznacza parametry i klasę jakości i niezawodności PP. Wydzielane ciepło na zestykach oraz nałożone w tym momencie przebiegi mogą spowodować uszkodzenia tranzystora MOSFET. Firmy produkujące PP stosują różne sposoby odprowadzenia na zewnątrz ciepła poprzez obudowę DIL lub SIL. Firma AT&T, celem lepszego odprowadzania ciepła, stosuje dużą strukturę tranzystorów MOSFET i fotogeneratora umieszczoną na jednej, dużej objętościowo blaszce tworzącej również nóżkę wyprowadzenia (rys. 6). Taka blaszka jest dodatkowym radiatorem odprowadzającym ciepło z umieszczonej na niej struktury tranzystora.

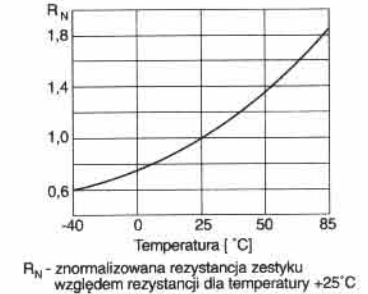
Firma CP Clare stosuje opatentowany sposób odprowadzania ciepła z PP poprzez osobne umieszczenie na każdej z blaszek tworzących nóżki wyprowadzeń, struktur każdego z tranzystorów MOSFET, osobno generatora fotoelektrycznego i osobno diody LED (rys. 1). Takie oddzielne rozmieszczenie każdego z elementów, a zwłaszcza tych wydzielających ciepło w czasie przewodzenia prądu, powoduje dobre odprowadzanie wydzielanego na nich ciepła poprzez wyprowadzenie-radiator oraz ogranicza szkodliwy efekt wzajemnego ogrzewania się struktur. Dzięki temu w obudowie DIL w tych PP może być wydzie-



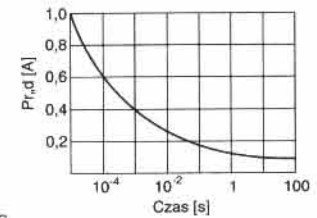
Rys. 6. Widok struktury PP małej mocy firmy AT&T. Wszystkie obwody mocy PP wykonane są na jednej płytce krzemowej umieszczonej na dużej blaszce radiatora, połączonej z jednym z wyprowadzeń.



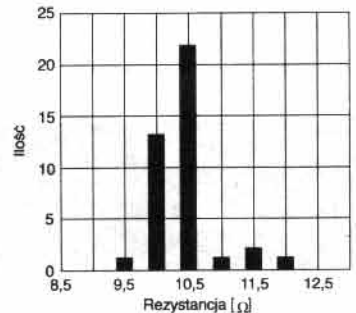
Rys. 7a.



Rys. 7b.



Rys. 7c.



Rys. 7d.

lona moc 0,8W przy temperaturze otoczenia +25°C i spadku dopuszczalnej mocy o 6,7mW/°C, aż do dopuszczalnej temperatury pracy +85°C. Spadek dopuszczalnej wydzielanej mocy na takim PP przedstawia rys. 7a. Wokół wyprowadzeń obudowy PP na obwodzie drukowanym należy stosować duże powierzchnie folii miedzianej, przez co tworzy się dodatkowy element odprowadzający ciepło. Należy zauważyć, że wzrost prądu przewodzenia w wyższych temperaturach można uzyskać przez zwiększenie prądu sterowania diody LED, gdyż wtedy przez dodatkową generację napięcia fotoelektrycznego można uzyskać dodatkowe wysterowanie

tranzystora MOSFET i zmniejszenie rezystancji przewodzenia kanału źródło-dren. Dopuszczalne ciągłe prądy przewodzenia PP osiągają wartości od 0,3 do 4A. Im mniejsza rezystancja zestyku tym jest większa dopuszczalna wartość ciągłego prądu przewodzenia. Dla PP na prąd 350mA wynosi ona 3..5 omów przy dopuszczalnym napięciu wstecznym 400V, a dla PP na prąd 1,8A wynosi 0,1..0,5 oma przy napięciu zaledwie 60V. PP mogą przewodzić przez krótkie odcinki czasu duże impulsy prądowe kilkakrotnie przewyższające wartość prądu średniego (rys. 7b). Energia tych impulsów musi być tak dobrana by nie uszkodzić cieplnie tranzystorów przełączają-

cych MOSFET. Izolacja optyczna dodatkowo korzystnie odizolowuje oddziaływania ciepłe obwodów sterowania i przełączania. Przy wzroście temperatury rośnie również rezystancja zestyku w PP (rys. 7b). Przy wzroście temperatury otoczenia z +25°C do +85°C wzrasta ona prawie dwukrotnie. Ze względu na łatwość przesterowania a w rezultacie uszkodzenia zestyków PP stosuje się w nich zabezpieczenie przed przeciążeniem prądowym oraz nadmiernym szkodliwym wzrostem temperatury przekaźnika wywołanym przewodzeniem przez niego sygnałów mocy.

**Marek Dras**