

PORADNIK PROJEKTANTA PCB

Przewodnik po komponentach elektronicznych

(Część 2)

Autorem tej broszury jest **Piotr Kosakowski**
- kierownik działu kontroli jakości w
Nanotech Elektronik Sp. z o.o.



Kilka słów od autora

W dziale kontroli jakości każdy produkt przechodzi swoją ostatnią, kluczową weryfikację przed wysyłką do odbiorcy. To właśnie tutaj realizujemy nasz główny cel – dostarczanie rozwiązań spełniających najwyższe standardy i w pełni odpowiadających oczekiwaniom klientów.

Kontrola jakości to jednak nie tylko piecza nad gotowym wyrobem. To także ścisła współpraca z działem produkcji, logistyki czy zakupów, dzięki której możemy wspólnie dbać o każdy etap procesu. Kluczowym narzędziem naszej pracy jest urządzenie do automatycznej inspekcji optycznej (AOI) marki YAMAHA, model YSi-V HS2. Dzięki tworzeniu własnej biblioteki komponentów elektronicznych w maszynie, podnosimy precyzję weryfikacji i utrzymujemy poziom jakości zgodny z coraz bardziej rygorystycznymi normami.

Naszym celem jest symbioza z działem produkcji – wspólnie dopracowujemy szczegóły i szlifujemy detale. Dysponując ustandaryzowanymi międzynarodowymi normami technologicznymi oraz nowoczesnymi stanowiskami kontroli końcowej, jesteśmy przygotowani do rzetelnego potwierdzania i eliminowania wszelkich wad technologicznych. Zespół działu kontroli jakości z najwyższą starannością analizuje każdy etap produkcji wyrobów elektronicznych, aby móc wykryć niedoskonałości.

Odpowiedzialność, jaka na nas spoczywa, daje nam satysfakcję i poczucie dumy. To właśnie dzięki naszej pracy klient otrzymuje produkt wolny od błędów – taki, który z pełnym przekonaniem możemy sygnować marką naszej firmy.

Spis treści

Część 1 (poprzednia broszura)

- 1. Podstawowe informacje o komponentach elektronicznych**
 - 1.1 Klasyfikacja komponentów elektronicznych
 - 1.2 Rodzaje obudów komponentów elektronicznych
 - 1.3 Metody pakowania komponentów elektronicznych
 - 1.4 Struktura nazw komponentów (Part Number)
 - 1.5 Normy Pro-electron/EECA, JEDEC, JIS dotyczące nazewnictwa komponentów i ich obudów
 - 1.6 Szeregi E wartości rezystancji i pojemności
 - 1.7 Normy i wymagania branży motoryzacyjnej (Automotive)

- 2. Elementy pasywne**
 - 2.1 Rezystory
 - 2.2 Typy rezystorów
 - 2.3 Szczegóły zastosowania oraz dobór zamienników dla różnych typów rezystorów
 - 2.4 Kondensatory
 - 2.5 Główne parametry kondensatorów
 - 2.6 Typy kondensatorów
 - 2.7 Szczegóły zastosowania oraz dobór zamienników dla różnych typów kondensatorów

Część 2 (ta broszura)

- 2.8 Cewki indukcyjne, dławiki, komponenty EMI/EMC
 - 2.9 Transformatory
 - 2.10 Rezonatory kwarcowe, generatory (oscylatory) kwarcowe, filtry kwarcowe i ceramiczne
 - 2.11 Bezpieczniki
 - 2.12 Pozostałe elementy pasywne
-
- 3. Elementy aktywne**
 - 3.1 Diody
 - 3.2 Tranzystory
 - 3.3 Układy scalone
 - 3.4 Pozostałe elementy aktywne

Część 3 (następna broszura)

4. Elementy optoelektroniczne

- 4.1 Diody LED
- 4.2 Optoizolatory
- 4.3 Wyświetlacze
- 4.4 Fotelementy
- 4.5 Pozostałe elementy optoelektroniczne

5. Elementy elektromechaniczne

- 5.1 Złącza
- 5.2 Przekazniki
- 5.3 Przyciski i przełączniki
- 5.4 Przewody i kable
- 5.5 Pozostałe elementy elektromechaniczne

Kontakty

W razie jakichkolwiek pytań zachęcamy do kontaktu z nami. Dzięki temu zawsze uzyskają Państwo wyczerpujące informacje zarówno w zakresie projektowania i konstrukcji obwodów, jak również praktyczne informacje określające czas wykonania i dostawy produktów. Zawsze chętnie i z przyjemnością dzielimy się naszą wiedzą oraz doświadczeniem, a także dbamy o najwyższą jakość wykonywanych przez nas projektów, co może potwierdzić grono naszych klientów w Polsce i poza granicami kraju.

Można też skontaktować się z nami telefonicznie pod numerem **+48 338 338 338** lub napisać do nas na adres e-mail: biuro@nanotech-elektronik.pl (polska obsługa) lub office@nanotech-elektronik.com (w językach angielskim i niemieckim).

Z poważaniem,

Zespół Nanotech Elektronik Sp. z o.o.

2.8 Cewki indukcyjne, dławiki, komponenty EMI/EMC

2.8.1 Cewki i dławiki

Cewka (induktor) magazynuje energię w polu magnetycznym wytworzonym przez prąd. W praktyce stosujemy uzwojenie z miedzi (czasem drut licowy dla ograniczenia efektu naskórkowego) oraz rdzeń: powietrzny albo magnetyczny.

Rdzeń magnetyczny (ferryt, proszek żelaza, stopy Fe-Si-Al, MPP, nanokrystaliczne) zwiększa indukcyjność przy tej samej liczbie zwojów i pozwala zmniejszyć rozmiar, ale wprowadza zjawisko nasycenia i strat rdzeniowe zależne od częstotliwości. Rdzenie ze szczeliną powietrzną „usztywniają” indukcyjność wobec składowej stałej, dlatego dławiki mocy w przetwornicach buck/boost projektujemy jako rdzenie szczelinowane lub z materiału proszkowego, który ma rozproszoną „wewnętrzną szczelinę”. Cewki powietrzne nie ulegają nasyceniu i osiągają bardzo wysoką częstotliwość samorezonansową, przez co stosujemy je w obwodach RF, VCO, dopasowaniach antenowych i w zwrotnicach audio, gdy zależy nam na maksymalnej liniowości — kosztem większej liczby zwojów, wyższych strat AC i gabarytu.



Dobierając induktor, patrzymy nie tylko na L i tolerancję, lecz także na prąd nasycenia (I_{sat} – spadek L pod wpływem DC), prąd znamionowy (I_{rms} – nagrzewanie uzwojenia), rezystancję DC (DCR), częstotliwość samorezonansową (Self Resonance Frequency - SRF), dobroć Q (istotna w filtrach rezonansowych), straty rdzeniowe oraz temperaturę pracy i kwalifikację (np. AEC-Q200). Do torów mocy wybieramy zwykle dławiki ekranowane (mniejszy strumień rozproszenia i emisja), a w aplikacjach RF – konstrukcje o bardzo wysokiej SRF. W przetwornicach impulsowych przyjmujemy I_{sat} powyżej szczytowego prądu dławika, I_{rms} z zapasem termicznym, DCR jak najniższe dla sprawności, a materiał rdzenia dopasowujemy do częstotliwości przełączania: ferryt (małe straty przy

setkach kHz–MHz, mniejsza odporność na DC), proszek/aloy (większa odporność na DC, wyższe straty AC).

Podzespoły występują w obudowach: SMD: Chip, Chip Array; THT: Axial, Radial.

- **Cewki sygnałowe (RF, małe indukcyjności)** – SMD: Chip 0402–1210; THT: Axial.
- **Dławiki mocy** – SMD: „power inductor” (SMD 3×3...10×10 mm); THT: Radial, toroidalne.
- **Koraliki ferrytowe / EMI** – SMD: Chip, Chip Array; THT: Radial.

2.8.2 Komponenty EMI/EMC

EMI to zakłócenia elektromagnetyczne, EMC – zdolność urządzenia do pracy w ich obecności i bez nadmiernej emisji. W praktyce ograniczamy emisję przewodzoną i promieniowaną oraz zwiększamy odporność, tak aby spełnić wymagania (np. CE/CISPR/FCC) i nie zanieczyszczać sieci zasilającej innym sprzętem. Stosujemy trzy grupy środków: elementy tłumiące, topologie filtrów oraz poprawny układ PCB/okablowania.

Koraliki ferrytowe (ferrite beads)

wstawiamy w szereg z liniami zasilania i sygnałowymi blisko źródła zakłóceń. Ich impedancja rośnie w paśmie setek MHz, ponieważ materiał ferrytowy zamienia energię zaburzeń na ciepło. W DC zachowują się jak bardzo mały rezystor, ale pod obciążeniem



stałoprądowym ich skuteczność spada – charakterystyki $Z(f)$ silnie zależą od prądu i temperatury. Gdy łączymy koralik z kondensatorem do masy, powstaje mini-filtr LC/ π – skuteczny, lecz podatny na rezonanse; tłumimy je dodając niewielki opór szeregowy lub wybierając koralik o „stratnym” profilu impedancji. Nie stosujemy koralików jako „dławików mocy” dla dużych prądów tętniących.

Dławiki wspólnomodowe (CMC) to dwa uzwojenia na jednym rdzeniu, przez które przepuszczamy przewody pary (zasilanie, linia sygnałowa). Prąd różnicowy (użyteczny) sumuje się magnetycznie do zera i przechodzi prawie bez strat, natomiast prąd wspólny (zakłócenie) widzi dużą impedancję i jest tłumiony. Na

zasilaniu AC/DC CMC łączymy zwykle z kondensatorami klasy X/Y tworząc filtr sieciowy; w interfejsach (USB, Ethernet, CAN, LVDS) wybieramy CMC o dużej impedancji CM i małej insercji strat dla trybu różnicowego w paśmie pracy. Pamiętajmy o ryzyku nasycenia CMC przez składową DC – na wejściu SMPS stosujemy wtedy rdzenie i szczeliny dobrane do prądu.

Dławiki różnicowe i filtry LC/ π /T. W torach zasilania niskonapięciowego, gdzie dominują zakłócenia różnicowe z przetwornic, użyteczne są dławiki szeregowe i filtry LC; przy dużych impedancjach źródła/obciążenia lepiej sprawdza się topologia T (L–C–L), a gdy potrzebujemy silniejszego tłumienia wysokich częstotliwości – π (C–L–C). Dobieramy elementy tak, aby SRF induktora leżała powyżej pasma zakłóceń, a kondensatory miały niską ESL/ESR przy częstotliwości pracy (MLCC wielu wartości zamiast jednego „dużego”).

Kondensatory klasy X/Y i przelotowe. Kondensatory X (między L–N) i Y (do PE) są elementami „bezpieczeństwowymi” o określonych klasach udarowych, które ograniczają zaburzenia przewodzone i zapewniają powrót prądu zakłócenia do źródła. Kondensatory przelotowe (feed-through) dają bardzo małą indukcyjność połączenia i świetne tłumienie do kilku GHz – stosujemy je w krytycznych przepustach zasilania.

Węcej informacji o kondensatorach bezpieczeństwa znajdziemy w paragrafie 2.6 pierwszej części broszury o komponentach.

Rdzenie kablowe, snubbery, TVS. Rdzenie zatraskowe na kablach podbijają impedancję CM bez zmian w PCB. Snubbery RC/RCD gaszą dzwonienia i ograniczają pasma emisji w przetwornicach oraz driverach kluczujących. Diody TVS nie redukują emisji, ale poprawiają odporność ESD/EFT, co jest częścią EMC.

2.9 Transformatory

Transformator przenosi energię pomiędzy obwodami za pomocą sprzężenia magnetycznego. Zmienne pole w rdzeniu, wytworzone przez prąd w uzwojeniu pierwotnym, indukuje napięcie w uzwojeniu wtórnym zgodnie z przekładnią zwojową. Dzięki temu uzyskujemy dopasowanie napięć i prądów, separację galwaniczną oraz – w odmianach pomiarowych – bezpieczne odwzorowanie sygnału.



Budowa

W najprostszym ujęciu mamy rdzeń magnetyczny, uzwojenia z miedzi (druć okrągły, przewód licowy, taśma/folia Cu), izolację dielektryczną i nośnik mechaniczny (korpus, karkas). Rdzeń dobieramy do częstotliwości i mocy: blachy krzemowe lub amorficzne do 50/60 Hz, ferryty miękkie do przetwornic kilkudziesięciu–kilkuset kHz, proszkowe i gapowane ferryty, gdy potrzebujemy magazynować energię (np. flyback). Kształt rdzenia (EI/UI, toroidalny, RM, ETD, EFD, PQ, kubkowy, planar) przekłada się na rozproszenie pola, sprawność, wymiary i łatwość nawijania. Izolację budujemy warstwowo, przestrzegając odstępów pełzania/przebiecia i klas temperaturowych (A/B/F/H). W transformatorach czułych na zakłócenia dodajemy ekran elektrostatyczny między uzwojeniami lub ekran magnetyczny zewnętrzny. Całość często impregnujemy lub zalewamy żywicą, aby zredukować hałas mechaniczny i poprawić odprowadzanie ciepła.

Parametry, które realnie decydują w projekcie

Poza przekładnią liczy się moc (VA) i sprawność, rezystancja uzwojeń oraz regulacja napięcia (spadek pod obciążeniem), straty rdzenia i miedzi (a więc wzrost temperatury), indukcyjność rozproszenia i pojemność międzyuzwojeniowa (wpływ na EMI i pasmo), wytrzymałość izolacji (hipot, SELV), klasa temperaturowa i dopuszczalna temperatura uzwojeń, dla przetwornic dodatkowo materiał rdzenia i dopuszczalna indukcja przy danej częstotliwości oraz geometria okna (współczynnik wypełnienia miedzią). W

transformatorach sygnałowych dochodzą: pasmo przenoszenia i płaskość charakterystyki, impedancje wej./wyj., zniekształcenia (histereza, nasycenie, prąd magnesujący), symetria i pojemność pasożytnicza (CMRR przy separacji interfejsów).

Główne rodziny i gdzie je stosujemy

Transformatory sieciowe 50/60 Hz stosujemy do zasilania klasycznego: obniżamy/ podwyższamy napięcie i zapewniamy separację. Wersje EI są tańsze i tolerują szczeliny powietrzne między blaszkami, toroidy są cichsze elektromagnetycznie i mniejsze objętościowo, ale mają duże prądy rozruchowe i są wrażliwe na składową DC w sieci.

Transformatory bezpieczeństwa/separacyjne zapewniają izolację wzmacnianą do obwodów SELV.

Autotransformator wykorzystujemy, gdy nie wymagana jest separacja, za to liczy się sprawność i niewielki gabaryt (np. regulacja 230 \leftrightarrow 115 V). Transformatory impulsowe pracują w przetwornicach SMPS (flyback, forward, pół/pełny mostek, LLC). Tu decyduje ferryt, gapping (do magazynowania energii przy flyback), sposób układania warstw (przeplatanie zmniejsza indukcyjność rozproszenia i pikowania, ale podnosi pojemność – ważny kompromis EMC), oraz minimalizacja pól rozproszonych. W wariacie planar wykorzystujemy miedziane ścieżki/warstwy PCB jako uzwojenia, uzyskując niski profil i powtarzalność.

Transformatory sygnałowe obejmują audio (mikrofonowe, liniowe, wyjściowe do wzmacniaczy lampowych), telekomunikacyjne/ethernetowe (izolacja i dopasowanie, odczepy PoE, wytrzymałość 1,5–2,5 kVrms), transformatory bramkowe driverów MOSFET/IGBT, impulsowe do formowania krótkich impulsów oraz transformatory RF/baluny do dopasowania i konwersji trybu (symetryczny \leftrightarrow niesymetryczny) w torach w.cz.

Przekładniki prądowe i napięciowe wykorzystujemy do pomiaru i sprzężenia zwrotnego. CT przenosi informację o prądzie na rezystorze obciążeniowym; dbamy o to, by nigdy nie zostawiać go w stanie otwartym przy przepływie prądu – grożą wysokie napięcia i nasycenie.

Dobór transformatora sieciowego - na co zwracamy uwagę

Zaczynamy od mocy VA z zapasem (typowo 20–50% ponad moc obciążenia, więcej przy trudno przewidywalnych prądach szczytowych). Napięcia wtórne planujemy „po prostowniku”: uwzględniamy wzrost napięcia bez obciążenia i spadek pod obciążeniem oraz tętnienia po filtracji. Jeżeli zależy nam na niskim polu rozproszonym i akustycznym, wybieramy toroid i przewidujemy soft-start lub NTC, a przy wrażliwych układach analogowych dodajemy ekran elektrostatyczny. W układach z wymogiem bezpieczeństwa stosujemy transformatory z deklaracją zgodności (np. EN/IEC 61558) i odpowiednią izolacją wzmocnioną, a w części wtórnej projektujemy obwody SELV z zachowaniem odstępów. Mechanicznie przewidujemy dystanse i tłumienie drgań (podkładki gumowe), a termicznie – swobodny przepływ powietrza lub przykręcenie do masywnej powierzchni.

Transformatory występują w obudowach: SMD: SMD-DIL, DFN/QFN; THT: DIP, SIP, RM, EE, EI, ETD.

- **Transformatory sygnałowe / Ethernet** – SMD-DIL, DFN; THT: SIP/DIP.
- **Transformatory impulsowe / przetwornicowe** – SMD: EFD/EP w wersjach SMD; THT: RM, EE, ETD, PQ.
- **Transformatory sieciowe** – THT: EI (pionowe/poziome).

2.10 Rezonatory kwarcowe, generatory (oscylatory) kwarcowe, filtry kwarcowe i ceramiczne

2.10.1 Rezonatory kwarcowe

Budowa i zasada działania

Rezonator kwarcowy to płytka kryształu SiO_2 z napyłonymi elektrodami, zamknięta w obudowie metalowej (np. HC-49, UM-1) lub SMD (np. 2016, 2520, 3225, 5032, 7050). Mechaniczne

drgania własne kryształu przekładamy na drgania elektryczne (efekt piezoelektryczny). Równoważny obwód elektryczny tworzą: L_m , C_m , R_s (gałąź



„ruchoma”) równoległe z C_0 (pojemność obudowy/elektrod). Rezonator pracuje na modzie podstawowym lub na **overtone** (wyższe harmoniczne – gdy chcemy uzyskać wyższe częstotliwości).

Typowe cięcia i konsekwencje

Stosujemy głównie cięcia **AT** (uniwersalne, dobra stabilność temperaturowa), **BT** (wyższe częstotliwości), w zastosowaniach o podwyższonej odporności na naprężenia - **SC**. Rezonatory zegarkowe 32,768 kHz mają konstrukcję kamertonową.

Kluczowe parametry doboru

- **Częstotliwość i tryb** (fundamental/overtone).
- **CL – pojemność obciążająca** (typowo 8–20 pF; zegarkowe zwykle 12,5 pF). Dla powszechnego generatora Pierce’a dobieramy kondensatory: $C1 \approx C2 \approx 2 \cdot (CL - C_{stray})$, gdzie C_{stray} to pojemność pasożytna płytki/układu (zwykle 2–5 pF).
- **ESR (R_s) i margines ujemnej rezystancji** układu. Projektowo zapewniamy $|-R| \geq 5 \times ESR$, żeby start był pewny.
- **Tolerancja i stabilność** (np. $\pm 10 \dots \pm 50$ ppm @ 25 °C; długoterminowo starzenie rzędu $\pm 1 \dots \pm 5$ ppm/rok).
- **Drive level** (moc pobudzania, typowo 1–100 μ W; dla zegarkowych ≤ 1 μ W). Przekroczenie skraca żywotność i pogarsza stabilność.
- **Zakres temperatur** (np. $-40 \dots +85$ °C, $-40 \dots +125$ °C).

Zalety

Bardzo dobra stabilność częstotliwości i niskie szумы fazowe, niski koszt dla popularnych częstotliwości, szeroka dostępność obudów, mały pobór mocy (sam rezonator nic nie zużywa).

Wady / pułapki

Wymagają poprawnego układu oscylatora i doboru CL (inaczej problemy ze startem, odstrojenie, nadmierne jittery). Czułe na naprężenia PCB (odkształcenia = dryft ppm), drgania i wstrząsy (mikrofonowanie). Nietrywialny dobór przy rzadkich częstotliwościach; overtony wymagają ostrożnej aplikacji.

Wskazówki aplikacyjne

Lokalizujemy blisko wejść oscylatora MCU/PLL, ścieżki **krótkie i symetryczne**, masa pod spodem (bez przelotek pod padem, jeśli producent nie zaleca), kondensatory **NPO/COG**. Unikamy klejenia na sztywno (stres mechaniczny). Ekranowanie i „guard” masowy minimalizują zakłócenia. Dla 32,768 kHz szczególnie pilnujemy bardzo małych prądów i poprawnego CL.

2.10.2 Generatory (oscylatory) kwarcowe

Generator kwarcowy (XO) to **moduł** zawierający rezonator kwarcowy oraz elektronikę oscylatora i bufor wyjściowy w jednej obudowie (zwykle 4 piny: VCC, GND, OUT, EN/NC). Dostępne są odmiany:



- **XO** – standardowy generator. Stabilność typ. $\pm 25 \dots \pm 100$ ppm.
- **VCXO** – XO z wejściem strojenia napięciem (pulling $\pm 50 \dots \pm 200$ ppm).
- **TCXO** – kompensacja temperaturowa. Stabilność typ. $\pm 0,5 \dots \pm 2,5$ ppm.
- **VCTCXO** – TCXO z wejściem strojenia.
- **OCXO/DOCXO** – piecyk (utrzymywanie stałej temperatury kwarcu). Stabilność rzędu $\pm 0,01 \dots \pm 0,1$ ppm kosztem poboru mocy i czasu nagrzewania.

Wyjścia i interfejsy

Dobieramy pod system: **LVC MOS/CMOS, clipped-sine** (RF/niska emisja), **LVDS, LVPECL, HCSL** (szybkie interfejsy, zegary SerDes/PCIe). Typowe zasilania 1,8V/2,5V/3,3V/5V. Często jest pin **Enable/Standby** (oszczędność energii).

Parametry doboru

- **Częstotliwość, typ wyjścia, VCC** i kompatybilność z obciążeniem (np. 15 pF dla CMOS).
- **Stabilność** (ppm całkowite: tolerancja + temp. + starzenie), **jitter RMS**/szum fazowy (istotne dla PHY/PLL).
- **Czas startu/warm-up** (OCXO dziesiątki sekund, XO/TCXO zwykle ms).
- **Zakres temp., EMI** (stromość zbocza; czasem prosimy producenta o wolniejsze zbocza).
- **Obudowa:** 7050/5032/3225/2520 itp., dostępność standardowych footprintów na PCB.

Zalety

„Plug-and-play” – nie dobieramy CL/rezystancji ujemnej, wysoka powtarzalność, lepszy jitter/stabilność (zwłaszcza TCXO/OCXO), pewny start przy dużym ESR lub w trudnym środowisku.

Wady

Wyższy koszt i pobór mocy niż „goły” kwarc, większa objętość, silniejsze zbocza (EMI), czasem dłuższy lead-time dla specyficznych częstotliwości.

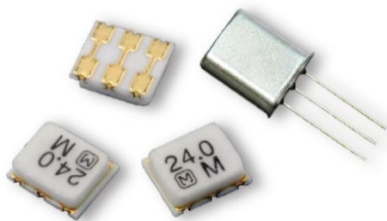
Zastosowania

GNSS, komórkowe/LTE, Ethernet/SyncE, zegary referencyjne PLL, urządzenia pomiarowe, audio o podwyższonej stabilności, systemy czasu rzeczywistego wymagające niskiego jittera.

Wskazówki aplikacyjne

Stosujemy bliskie i solidne **odsprężanie** (100 nF + 1 μ F), czyste GND, krótką linię zegarową, właściwe **terminacje** dla wyjść różnicowych. Dobrze uwzględnić tryb **Disable** i stan wyjścia (Hi-Z / zatrzymanie na „0/1”).

2.10.3 Filtry kwarcowe i ceramiczne



Idea i topologie

Filtry wykorzystują wysokie **Q** rezonatorów piezoelektrycznych do kształtowania pasma. Budujemy je jako **drabinkowe (ladder)** lub **kratowe (lattice)** z szeregu/równoległych rezonatorów, tworząc wielobiegunowe

charakterystyki o wąskim paśmie i stromych zboczach.

Filtry ceramiczne

Powstają z rezonatorów ceramicznych (np. na BaTiO₃). Bardzo popularne w torach **IF 455 kHz (AM)** i **10,7 MHz (FM)**, w audio/video i radiu konsumenckim.

- **Zalety:** niska cena, niewielkie rozmiary, gotowe fabryczne „klocki” o określonej impedancji, prosta aplikacja.
- **Wady:** niższe Q niż kwarc – **szersze pasma**, gorszy „shape factor”, większy wpływ temperatury, większe zafalowanie opóźnienia grupowego.
- **Typowe liczby:** tłumienie wtrąceniowe 3–8 dB, szerokości pasma rzędu kilku–kilkunastu kHz (455 kHz) i ~150–300 kHz (10,7 MHz).

Filtry kwarcowe

Wykorzystują kryształy kwarcowe – spotykane w torach **HF/IF** (np. 9 MHz, 10,7 MHz, 21,4 MHz), w komunikacji profesjonalnej/wojskowej, urządzeniach pomiarowych, SDR.

- **Zalety:** bardzo wysokie Q → **wąskie pasma** (np. ~2,4–3 kHz dla SSB, ~500 Hz dla CW), świetna selektywność i stabilność, dobry shape factor, niski dryft.
- **Wady:** wyższy koszt, wymagają **dopasowania impedancji** (często sieci R/C/L), większe tłumienie wtrąceniowe dla wąskich pasm, bardziej wymagające projektowo.

Projektowanie i aplikacja

- **Impedancja i dopasowanie.** Producent podaje impedancję końcową; w razie różnicy stosujemy sieci dopasowujące (rezystory terminujące, lekkie sprzęgające C, ewentualnie obwody L).
- **Budowa wielobiegunowa.** Liczba i sprzężenie między rezonatorami determinują szerokość pasma, tłumienie i shape factor – rośnie selektywność kosztem tłumienia i wrażliwości na tolerancje.
- **Rozmieszczenie PCB.** Krótkie, symetryczne połączenia, dobra masa wokół, unikanie agresywnych linii RF/digital; wrażliwe na szumy zasilania torów aktywnych przed/po filtrze.
- **Parametry, które weryfikujemy:** pasmo przy -3 dB / -6 dB, **shape factor** (np. -6 dB/-60 dB), **tłumienie wtrąceniowe**, **falowanie w paśmie** (ripple), **opóźnienie grupowe**, temperatura i dryft.

Ceramiczne vs kwarcowe – kiedy które stosujemy

- **Ceramiczne:** gdy liczy się koszt/rozmiar i „wystarczająca” selektywność (odbiorniki konsumenckie, AM/FM-IF, filtry przeciwwzakłóceniami w sygnałach o średnich Q).
- **Kwarcowe:** gdy wymagana jest **wysoka selektywność i stabilność** (radiokomunikacja zawodowa, SSB/CW, instrumenty pomiarowe, systemy telemetryczne).

Uwaga: w pasmach VHF/UHF szeroko używamy również **filtrów SAW/BAW** (fala akustyczna na powierzchni/objętości) – to odrębna rodzina elementów piezoelektrycznych, ale **nie** filtry „kwarcowe” w sensie tej sekcji.

Podzespoły występują w obudowach: SMD: DFN/QFN, SMD-DIL; THT: HC-49/U, HC-49/S, SIP.

- **Rezonatory kwarcowe** – SMD: 2016, 3225, 5032, 7050; THT: HC-49/U, HC-49/S.
- **Generatory kwarcowe (oscylatory)** – SMD: SMD-DIL-4/5/7, DFN/QFN; THT: DIL-14.
- **Rezonatory ceramiczne / filtry** – SMD: 3213, 3225; THT: SIP-2, SIP-3.

2.11 Bezpieczniki

Bezpiecznik jest elementem ochronnym, którego podstawowym zadaniem jest zabezpieczenie układu przed skutkami przeciążenia lub zwarcia. Przepływ zbyt dużego prądu powoduje zadziałanie zabezpieczenia i przerwanie obwodu albo silne ograniczenie prądu. W ten sposób chroni się delikatniejsze i kosztowniejsze komponenty przed uszkodzeniem.



Podczas doboru bezpiecznika należy zwrócić uwagę na:

- **prąd znamionowy** – maksymalna wartość, przy której element może pracować bez zadziałania,
- **czas reakcji** – szybki lub zwłoczny; istotne, gdy w obwodzie występują krótkotrwałe impulsy prądowe, które nie powinny powodować przerwy w pracy,
- **napięcie znamionowe** – napięcie, do którego bezpiecznik został zaprojektowany,

- **zdolność wyłączenia** – maksymalna energia i prąd zwarcioowy, jaki bezpiecznik jest w stanie bezpiecznie przerwać,
- **rodzaj zastosowania** – elektronika precyzyjna, układy zasilania, telekomunikacja czy ochrona linii przesyłowych.

2.11.1 Bezpieczniki resetowalne PTC

Bezpieczniki polimerowe typu PTC (ang. *Positive Temperature Coefficient*) działają na zasadzie nagrzewania materiału przewodzącego. W normalnych warunkach przewodzą prąd, a po przekroczeniu ustalonej wartości ich rezystancja gwałtownie rośnie, co ogranicza przepływ prądu. Po ochłodzeniu element automatycznie wraca do stanu początkowego. Ich największą zaletą jest możliwość wielokrotnego użycia, co eliminuje konieczność wymiany elementu po każdym zadziałaniu. Dzięki temu dobrze sprawdzają się w urządzeniach mobilnych, portach USB czy bateriach, gdzie wymagane jest samoczynne przywrócenie działania. Wadą jest jednak wolniejszy czas reakcji niż w przypadku bezpieczników topikowych, a także mniejsza precyzja prądu zadziałania, co ogranicza ich zastosowanie w układach wymagających bardzo szybkiej ochrony.

2.11.2 Bezpieczniki topikowe

Najstarszy i najpowszechniej stosowany typ. Elementem roboczym jest cienki drut (topik), który nagrzewa się i topi przy zbyt dużym prądzie, otwierając obwód. Mogą mieć formę cylindrycznych szklanych lub ceramicznych wkładek, a także miniaturowych wersji SMD. Ich największą zaletą jest prostota konstrukcji, niska cena i bardzo szybka reakcja na zwarcia. Dzięki temu stanowią niezawodne i skuteczne zabezpieczenie w wielu urządzeniach, od sprzętu AGD po zasilacze i elektronikę przemysłową. Minusem jest jednak to, że są elementami jednorazowego użytku – po zadziałaniu wymagają wymiany, co w praktyce wiąże się z przestojem pracy urządzenia.

2.11.3 Ochronne iskierniki gazowe (GDT)

Specjalny rodzaj zabezpieczenia, stosowany głównie do ochrony przed przepięciami. Składają się z dwóch elektrod zamkniętych w hermetycznej obudowie wypełnionej gazem. Przy przekroczeniu określonego napięcia gaz

jonizuje się, powodując powstanie iskry, która odprowadza nadmiar energii do uziemienia. Tego rodzaju zabezpieczenia są niezwykle skuteczne w ochronie przed wysokimi impulsami przepięciowymi i zajmują niewiele miejsca. Z drugiej strony nie reagują na zwykłe przeciążenia prądowe, dlatego nie mogą zastępować klasycznych bezpieczników topikowych czy PTC. Najczęściej stosuje się je w telekomunikacji, systemach antenowych, modemach i liniach transmisyjnych, gdzie ryzyko wyładowań atmosferycznych lub nagłych przepięć jest szczególnie duże.

Bezpieczniki występują w obudowach: SMD: Chip; THT: Axial, Radial, cylindryczne.

- **Bezpieczniki topikowe SMD** – Chip 0402–2920.
- **Bezpieczniki topikowe THT** – rurkowe 5×20 mm, 6.3×32 mm.
- **Bezpieczniki polimerowe PTC** – SMD: 1206, 1812, 2920; THT: Radial.

2.12 Pozostałe elementy pasywne

W ramach pozostałych elementów pasywnych warto omówić przede wszystkim terminatory linii i tłumiki rezystancyjne, obciążenia zastępcze oraz układy RLC zamknięte w jednej obudowie. Terminatory i tłumiki rezystancyjne stanowią podstawowe rozwiązanie stosowane w szybkich magistralach cyfrowych oraz w torach wysokiej częstotliwości, gdzie konieczne jest dopasowanie impedancji. Ich działanie polega na pochłanianiu energii sygnału tak, aby zapobiec powstawaniu odbić, które mogłyby powodować zniekształcenia i błędy transmisji. Najczęściej przyjmują formę pojedynczych rezystorów lub całych sieci rezystancyjnych, a w przypadku nowoczesnych urządzeń często dostępne są jako gotowe układy pasywne w obudowach SMD. Do ich zalet należy znaczna poprawa jakości przesyłanego sygnału i redukcja zakłóceń, natomiast wadą jest fakt, że powodują one dodatkową stratę mocy, a ich wartości muszą być starannie dobrane, aby skutecznie pełniły swoją funkcję.

Drugą grupą są obciążenia zastępcze, zwane także sztucznymi obciążeniami lub „dummy load”. Są to specjalnie zaprojektowane rezystory dużej mocy, których

zadaniem jest symulowanie pracy rzeczywistego odbiornika w układzie. Dzięki nim możliwe jest testowanie urządzeń takich jak wzmacniacze, nadajniki radiowe czy zasilacze bez ryzyka uszkodzenia właściwego odbiornika. Obciążenia zastępcze budowane są zazwyczaj na bazie rezystorów drutowych lub metalowych, umieszczonych w masywnych obudowach z radiatorem, a w przypadku dużych mocy wyposażonych dodatkowo w chłodzenie powietrzne lub cieczowe. Ich główną zaletą jest bezpieczeństwo i powtarzalność warunków testowych, ale należy pamiętać, że generują duże ilości ciepła i wymagają odpowiedniego odprowadzania energii, a przy tym są stosunkowo nieporęczne w porównaniu z innymi komponentami pasywnymi.

Ważną kategorię stanowią także sieci RLC, które w jednej obudowie łączą rezystory, kondensatory i cewki, tworząc gotowe układy dopasowujące lub filtrujące. Ich konstrukcja bazuje zwykle na technologii grubowarstwowej lub cienkowarstwowej na podłożach ceramicznych, co pozwala uzyskać bardzo kompaktowe i stabilne parametry. Takie rozwiązania są szczególnie przydatne w torach radiowych, w urządzeniach audio oraz w układach wymagających precyzyjnego filtrowania. Do ich zalet należy niewielki rozmiar, powtarzalność charakterystyk oraz wygoda montażu w masowej produkcji. Wadą natomiast jest ograniczona możliwość doboru konfiguracji, ponieważ projektant jest zmuszony zaakceptować wartości dobrane przez producenta, a w przypadku uszkodzenia jednego elementu najczęściej konieczna jest wymiana całego modułu.

3. Elementy aktywne

Elementy aktywne (czynne) to takie komponenty, które w obecności źródła energii potrafią wzmacniać sygnały, sterować prądem i napięciem oraz przełączać sygnały. Ich charakterystyki prądowo-napięciowe są nieliniowe. Do tej grupy zaliczamy m.in. diody, tranzystory i układy scalone — czyli komponenty omawiane w dalszych podrozdziałach.

Nazywamy je aktywnymi, ponieważ:

- **wprowadzają zysk mocy** (np. wzmacniacze) lub **aktywnie kształtują przepływ energii** z zasilania do obciążenia (przetwornice)
- **realizują nieliniowe funkcje**: prostowanie, progowanie, komutację, logikę
- **umożliwiają sterowanie** dużymi prądami/napięciami małymi sygnałami sterującymi (np. bramka MOSFET)

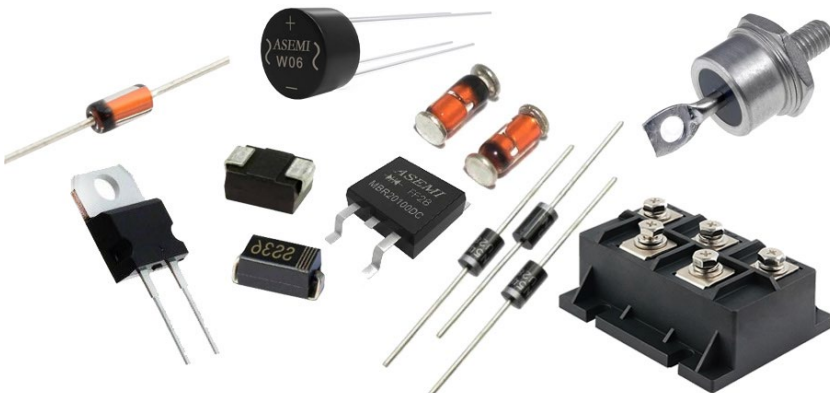
Jak są zbudowane — w skrócie

Najczęściej wykorzystują struktury półprzewodnikowe (złącza p-n, kanały MOS) tworzone przez domieszkowanie krzemu i odpowiednią geometrię masek. W układach scalonych łączymy miliony–miliardy takich elementów w jednej obudowie, uzyskując funkcje analogowe, cyfrowe i mieszane.

3.1 Diody

Dioda powstaje przez zetknięcie dwóch obszarów półprzewodnika: jednego z domieszkami akceptorowymi (typ p) i drugiego z donorowymi (typ n). Na styku tworzy się warstwa zaporowa – cienki obszar pozbawiony swobodnych nośników. To ona jest „furtką”, która przepuszcza prąd głównie w jedną stronę: przy polaryzacji w kierunku przewodzenia bariera się „obniża” i ładunki

przeptywają; po odwróceniu polaryzacji warstwa się poszerza i prąd maleje do szczątkowego (uptywowego).



Parametry doboru diod:

Wytrzymałość napięciowa - Producent podaje zwykle maksymalne powtarzalne napięcie wsteczne (VRRM). Dobieramy je z zapasem do najwyższego szczytowego napięcia, jakie pojawi się w układzie (uwzględnij wahania sieci, odbicia, przepięcia). W przemyśle i automotive sensowny bywa zapas 20–50% ponad realny szczyt. Jeżeli środowisko jest wymagające (motoryzacja), szukamy wersji kwalifikowanych wg AEC-Q101.

Prądy robocze i udary - W karcie spotkamy prąd średni przewodzenia (IF(AV)), prąd skuteczny oraz prąd udarowy (IFSM). Ten ostatni odpowiada na pytanie „czy dioda przeżyje pierwszy strzał ładowania kondensatora”. Do zasilaczy i mostków to parametr krytyczny – obudowa i pole miedzi decydują, czy ciepło zdąży odpłynąć.

Spadek napięcia w przewodzeniu (VF) - Zawsze patrzymy na wykres lub tabelę z VF dla konkretnego prądu i temperatury. Wpływa on wprost na straty mocy i temperaturę złącza. Diody Schottky'ego dają mniejszy VF, ale należy liczyć się z większym prądem upływu przy temperaturze.

Prąd upływu wstecznego (IR) - Wzrasta silnie z temperaturą, zwłaszcza w diodach Schottky'ego. W precyzyjnych torach, przy wysokich temperaturach lub dużych rezystancjach obciążenia, ten „mały” prąd zaczyna mieć znaczenie.

Szybkość przełączania - W klasycznych p-n ważny jest czas odwrotnego odzysku i odpowiadający mu ładunek – decydują o stratach i „czystości” odciążenia w SMPS.

Pojemność złącza (Cj) - Zależy od przyłożonego napięcia. Ma znaczenie w RF, w kształtowaniu impulsów i w ochronie linii sygnałowych (diody TVS na szybkie interfejsy powinny mieć niską pojemność).

Termika i dopuszczalne temperatury - Zwracamy uwagę na maksymalną temperaturę złącza i rezystancje termiczne (np. złącze→obudowa, złącze→otoczenie). Z nich oraz ze spodziewanej mocy strat oceniamy, czy obudowa i pole miedzi wystarczą. Nie lekceważymy krzywych obniżenia mocy – mówią, jak maleją dopuszczalne prądy wraz ze wzrostem temperatury.

Obudowa i montaż

Wybór między SMD a THT to nie tylko footprint, ale też zdolność do przenoszenia udarów i odprowadzania ciepła. Drobne SMD (SOD-123/323) świetnie sprawdzają się w sygnałach i małych prądach; SMA/SMB/SMC i DO-201 biorą większe udary i moc – różnią się gabarytem, metalizacją wyprowadzeń i możliwościami cieplnymi. Te rodziny obudów i ich oznaczenia to branżowy standard, więc łatwo porównamy zamienniki między producentami.

Parametry „specjalne”

W zależności od odmiany diody w nocie pojawiają się dodatkowe klucze: dla diod Zenera to napięcie stabilizacji przy określonym prądzie i współczynnik temperaturowy; dla diod TVS – napięcie robocze, próg zadziałania oraz poziom „ścięcia” przy zdefiniowanym impulsie; dla diod PIN – rezystancja sterowana prądem polaryzacji i czasy przełączeń; dla diod warikapowych – zakres pojemności versus napięcie i dobroć. Te szczegóły rozwinie przy omawianiu typów diod.

Nazewnictwo katalogowe

Rozpoznawalne symbole zgodne z JEDEC (np. 1N4148, 1N4007) podpowiadają klasę i ułatwiają dobór zamienników; często różni producenci używają tej samej „rodziny” nazw dla elementów o zbliżonych parametrach.

Dzieląc diody na kategorię możemy wyróżnić:

Diody prostownicze (Si p–n)

Klasyczna, pionowa struktura krzemowa z warstwą dryfu dobraną pod napięcie wsteczne, osadzona w obudowach THT (np. DO-41/DO-201) lub „mocowych” SMD (SMA/SMB/SMC), co zapewnia niezłą ścieżkę cieplną i odporność uderową. Cechują się wyraźnym spadkiem napięcia w przewodzeniu i „ogonem” przy odcięciu, ale są tanie, wytrzymałe i przewidywalne, dlatego stosujemy je głównie w prostownikach 50/60 Hz, filtrach zasilaczy i wszędzie tam, gdzie częstotliwości są niskie, a liczy się prosta, odporna część mocy.

Diody szybkie / ultraszybkie (Si p–n)

To wciąż złącza p–n, lecz technologicznie „odchudzone”, by szybko opróżniać ładunek mniejszościowy po wyłączeniu; dostajemy krótkie czasy wyłączenia i czystsze przełączanie kosztem nieco większego spadku przewodzenia oraz zwykle mniejszego IFSM. Stosujemy je jako prostowniki wtórne i diody powrotne w przetwornicach impulsowych, w prostownikach o podwyższonej częstotliwości oraz tam, gdzie ograniczamy straty i zakłócenia wynikające z odwrotnego odzysku.

Diody Schottky’ego (Si)

Złącze metal–półprzewodnik bez magazynowania ładunku mniejszościowego daje niski spadek przewodzenia i praktycznie brak „odzysku”, co przekłada się na małe straty przełączania; ograniczeniem jest niższa wytrzymałość wsteczna oraz rosnący z temperaturą prąd upływu. Stosujemy je przede wszystkim w niskonapięciowych SMPS jako prostowniki wtórne, w układach OR-ing zasilania oraz w szybkich obwodach kształtujących sygnały zasilające.

Diody Schottky’ego na SiC

Ta sama idea bariery Schottky’ego przeniesiona na węgiel krzemu daje wysokie napięcia wsteczne i dobrą pracę w podwyższonej temperaturze przy nadal znikomym odzysku; spadek przewodzenia i koszt są wyższe niż w krzemie. Stosujemy je w przetwornicach pracujących na setkach woltów (PFC, LLC,

flyback/buck-boost z szyn 400 V) oraz w układach, gdzie priorytetem jest redukcja strat przełączania i problemów EMI bez komplikowania sterowania.

Diody Zenera (stabilizacyjne)

Złącze p–n zaprojektowane do pracy w zaporze przy określonym napięciu: poniżej ~5,6 V dominuje mechanizm zenerowski (ujemny wpływ temperatury), powyżej — lawinowy (dodatni). Stosujemy je jako proste odniesienia napięcia, klamry węzłów analogowych i ograniczniki progowe; o jakości pracy decyduje punkt polaryzacji (rezystancja dynamiczna, szum) i uważne prowadzenie masy.

Diody TVS (transile)

To „Zenery” o dużej powierzchni czynnej i krótkiej ścieżce cieplnej, przygotowane do pochłaniania energii impulsów o zadanych kształtach (np. 8/20 μ s, 10/1000 μ s); występują wersje jednokierunkowe, dwukierunkowe i o niskiej pojemności. Stosujemy je do ochrony linii zasilania i szybkich interfejsów (USB, HDMI, linie sygnałowe), dobierając napięcie robocze i poziom „ścięcia” do profilu zakłóceń oraz montując tuż przy złączu z minimalną indukcyjnością powrotu.

Diody sygnałowe / przełączające (Si p–n)

Małe, szybkie struktury o niskiej pojemności złącza i krótkim czasie odcięcia sprawdzają się w kształtowaniu impulsów, przełączaniu sygnałów i prostych funkcjach logicznych; typowe rodziny w stylu 1N4148 są rozpoznawalne katalogowo i dostępne w THT oraz małych SMD (np. SOD-123/SOD-323), co ułatwia dobór zamienników i footprintów.

Diody PIN

Struktura p–i–n z niemal nie-domieszkowaną warstwą pośrodku zwiększa czas życia nośników, dzięki czemu w paśmie RF dioda zachowuje się jak rezystor sterowany prądem polaryzacji; przy odpowiednim biasie uzyskujemy bardzo niską rezystancję „włączoną” i wysoką „wyłączoną”. Stosujemy je w przełącznikach i tłumikach mikrofalowych oraz jako specjalne diody w prostownikach o wymaganej „miękkiej” charakterystyce powrotu.

Warikapry (diody pojemnościowe)

Wykorzystujemy zależność pojemności warstwy zaporowej od napięcia wstecznego, więc otrzymujemy „kondensator sterowany napięciem” o sensownej dobroci. Stosujemy je do strojenia VCO i filtrów w torach RF, gdzie

liczy się zakres pojemności, liniowość zmiany z napięciem oraz minimalizacja pasożytów layoutu.

Diody tunelowe i SRD

W pierwszych wykorzystujemy obszar ujemnej rezystancji, w drugich — gwałtowne „oddanie” ładunku przy odcięciu, co pozwala formować ultrastrome zbocza i bardzo krótkie impulsy. Stosujemy je w generatorach impulsów, mnożnikach częstotliwości i niszowych układach mikrofalowych, gdy wymagana jest ekstremalna szybkość, a scalone alternatywy nie dają porównywalnych krawędzi

Diody występują głównie w obudowach: SMD: SOD, SMA/SMB/SMC, DFN; THT: DO, DIP (mostki).

- **Diody prostownicze** – SMD: SMA, SMB, SMC; THT: DO-41, DO-201.
- **Diody Zenera** – SMD: SOD-123, SOD-323; THT: DO-35.
- **Diody Schottky’ego** – SMD: SMA, SMB, DFN; THT: TO-220, TO-247.
- **Diody impulsowe / sygnałowe** – SMD: SOD-523, SOD-323; THT: DO-35.
- **Diody TVS** – SMD: SMBJ, SMCJ, DFN; THT: P600, radialne.
- **Mostki prostownicze** – SMD: DFN, SMD-DIL; THT: DIP-4/SIP-4.

czujniki), korzystając z dobrych właściwości szumowych. Minusem są ograniczone napięcia i prądy oraz mniejsza dostępność nowoczesnych, wysokoprądowych typów w porównaniu z MOSFET.

MOSFET

MOSFET wykorzystuje izolowaną dielektrycznie bramkę, która przez pole elektryczne tworzy kanał między źródłem a drenem. Wejście ma charakter pojemnościowy, więc w stanie ustalonym nie wymaga prądu sterującego, natomiast przy przełączaniu musimy ładować i rozładowywać ładunek bramki. W wersjach małosygnałowych stosujemy je dla bardzo dużej impedancji wejściowej i minimalnych prądów upływu; w mocy — dla niskiej rezystancji włączenia oraz braku klasycznego nasycenia przy wzroście prądu. W projektach zwracamy uwagę na ładunki pasożytnicze (straty przełączania), diodę pasożytniczą w strukturze oraz wzrost $R_{DS(on)}$ z temperaturą. To podstawowy wybór w przetwornicach impulsowych, przełącznikach wysokoprądowych, zabezpieczeniach akumulatorów i przełączaniu linii zasilania.

IGBT

IGBT łączy sterowanie bramką jak w MOSFET z przewodzeniem z udziałem nośników mniejszościowych jak w tranzystorze bipolarnym. Dzięki temu przy napięciach rzędu kilkuset woltów uzyskujemy niższe straty przewodzenia niż w porównywalnych MOSFET. Stosujemy je w falownikach silników, spawarkach i przetwornicach sieciowych o umiarkowanych częstotliwościach. Ograniczeniem jest dłuższy czas wyłączenia spowodowany magazynowaniem ładunku, co podnosi straty dynamiczne i ogranicza częstotliwość przełączania.

GaN HEMT i SiC MOSFET (materiały szerokopasmowe)

Urządzenia na GaN i SiC oferują wysokie napięcia przebicia, mniejsze ładunki pasożytnicze i krótsze czasy przełączania. GaN HEMT wybieramy do zasilaczy wysokiej sprawności pracujących z wysoką częstotliwością oraz do zastosowań RF; SiC MOSFET stosujemy w cięższych aplikacjach wysokiego napięcia i temperatury (PV, napędy), gdzie liczy się niska rezystancja włączenia przy wysokim napięciu i duża odporność termiczna. W obu technologiach planujemy staranne prowadzenie mas i minimalizację pętli prądowych ze względu na bardzo strome zbocza oraz wymagania EMC; dobieramy też właściwe sterowanie bramką (napięcie, prędkość narastania, tłumienie).

Tranzystory występują głównie w obudowach: SMD: SOT, DFN/QFN, DPAK, D2PAK; THT: TO, SIP.

- **BJT małosygnalowe** – SMD: SOT-23, SOT-323; THT: TO-92.
- **MOSFET logic-level** – SMD: SOT-223, DFN/QFN; THT: TO-220.
- **MOSFET/IGBT mocy** – SMD: DPAK, D2PAK, Power-QFN; THT: TO-220, TO-247, TO-3.

3.3 Układy scalone



Pierwszą konstrukcją uznawaną historycznie za układ scalony uznajemy lampę próżniową Loewe 3NF. Ale to są lata 20 XX wieku. To z czym kojarzymy technologię układów scalonych, a więc półprzewodnikowe konstrukcję, miało swój rozwój w latach 50 i 60 XX wieku.

Układ scalony (IC) to zminiaturyzowany obwód elektroniczny wytworzony na jednym kawałku półprzewodnika (zwykle krzemu) i zamknięty w obudowie przystosowanej do montażu na PCB. W jednym chipie integrowane są tranzystory (MOSFET/BJT), rezystory i kondensatory cienkowarstwowe oraz wielowarstwowe połączenia metaliczne. W praktyce stosujemy układy monolityczne (zdecydowana większość) oraz hybrydowe (rzadziej, gdy potrzebne są elementy o nietypowych parametrach). Zależnie od funkcji

mówimy o układach cyfrowych, analogowych, mieszanych (mixed-signal), mocy, RF oraz pamięciach.

Rdzeniem jest matryca (die) zrealizowana fotolitograficznie. Elementy pasywne na chipie są „ekwiwalentami” (np. rezystory polikrzemowe, kondensatory MOS/MIM), a połączenia prowadzą w kilku warstwach metalu. Po wytworzeniu die łączymy z wyprowadzeniami obudowy drutami bondującymi (wire-bond) albo stawiamy kulki lutownicze i odwracamy chip (flip-chip, WLCSP). Obudowa i technologia wyprowadzeń bezpośrednio wpływają na termikę, indukcyjność pasożytniczą, impedancję wyprowadzeń i niezawodność montażu – dlatego przy doborze układów zawsze patrzymy równolegle na funkcję oraz pakiet.

Względem montażu układy występują jako THT (np. DIP) lub SMD/SMT (SOIC, TSSOP, QFN/QFP, BGA, WLCSP). Różnica montażowa jest kluczowa dla technologii produkcji i projektowania pól lutowniczych. W praktyce większość nowych IC dobieramy w obudowach SMD (QFN/QFP/BGA) — zapewniają mniejszą indukcyjność, lepszą gęstość upakowania i przewidywalne parametry wysokoczęstotliwościowe. Spis najpopularniejszych obudów SMD i THT oraz ich nazwy skrótowe (SOIC, TSSOP, QFN, QFP, BGA, WLCSP, DIP itd.) znajdziemy w rozdziałach o obudowach komponentów.

Klasy funkcjonalne i na co zwracamy uwagę

Układy analogowe. Do tej grupy zaliczamy wzmacniacze operacyjne, komparatory, referencje napięciowe, LDO oraz kontrolery i drivery przetwornic. Dobierając je, zwracamy uwagę na zakres i stabilność zasilania, napięcie wyjściowe (LDO), prąd i sprawność (moc), szумы, offset i dryft, pasmo/prędkość narastania, PSRR oraz mechanizmy zabezpieczeń (OCP/OTP/SCP). W praktyce ważniejsza od „rekordowych” liczb bywa stabilność, powtarzalność i dostępność wersji automotive.

Mixed-signal (ADC/DAC/PLL). W ADC i DAC kluczowe są rozdzielczość oraz realna efektywna liczba bitów (ENOB), pasmo i architektura (SAR/ $\Delta\Sigma$) oraz interfejs (SPI/I²C/parallel). Przy PLL/oscylatorach patrzymy na zakres częstotliwości, jitter i stabilność temperaturową. Dla całej klasy mixed-signal krytyczne są kondensatory odsprężające „tuż przy pinach”, separacja mas AGND/DGND i layout ścieżek zegarowych.

Cyfrowe (MCU/SoC/DSP/FPGA). Dobierając mikrokontroler/SoC, patrzymy na rdzeń i taktowanie, pamięci wbudowane, peryferia (UART, SPI, I²C, USB, CAN/LIN, Ethernet), liczbę i rodzaj GPIO oraz narzędzia i wsparcie (toolchain, biblioteki HAL). W FPGA/DSP oceniamy zasoby logiczne/ DSP slices, pamięci blokowe i interfejsy szybkiej komunikacji. W projektach produkcyjnych uwzględniamy długoterminową dostępność, ścieżkę drugiego źródła oraz politykę EOL.

Pamięci (Flash/EEPROM/SDRAM/DRAM). Kryteria to pojemność, organizacja, czas dostępu/opóźnienia, retencja danych i liczba cykli zapisu. Ważne są także poziomy I/O (1,8 V/3,3 V), protokoły (SPI/QSPI/SDR/DDR) i wymagania zasilania (sekwencja power-up).

RF/bezprzewodowe. Transceivery i front-endy RF dobieramy według pasma, modulacji, czułości, poziomu wyjściowego, EVM i wymagań certyfikacyjnych. Layout i dopasowanie są integralną częścią projektu: stosujemy krótkie linie 50 Ω, ekrany i porządną masę powrotną.

Mocy i drivery. W kontrolerach przetwornic i driverach bramek liczą się dopuszczalne napięcia/prądy, architektura (buck/boost/flyback), sprawność, zakres PWM, zabezpieczenia oraz parametry przełączania wpływające na emisję i straty.

Interfejsy/transceivery. Dla CAN/RS-485/USB/Ethernet ważne są poziomy logiczne, ESD/latch-up, zakresy common-mode, prądy w stanie „fail-safe” oraz zgodność ze standardami. W praktyce dobieramy te układy razem z topologią złącz i ochroną ESD/TVS.

Czujniki zintegrowane (MEMS, temperatury, ciśnienia, IMU). Stosujemy je, gdy liczy się dokładność, powtarzalność, kalibracja fabryczna, dryft długoterminowy i łatwy interfejs (I²C/SPI). W dokumentacji szukamy informacji o filtrach cyfrowych i trybach oszczędzania energii.

Parametry doboru „ponad funkcją”

Niezależnie od klasy funkcjonalnej sprawdzamy: zakres napięć i prądów, pobór mocy/energię w trybach uśpienia, tolerancje poziomów I/O, parametry termiczne pakietu (jak efektywność odprowadzania ciepła), odporność ESD i zjawisko latch-up, zakres temperatur pracy oraz poziom MSL (wrażliwość na

wilgoć w procesie lutowania). W aplikacjach motoryzacyjnych wymagamy kwalifikacji AEC-Q100 dla układów scalonych, co oznacza dodatkowe testy środowiskowe i niezawodnościowe oraz klasy temperaturowe (np. -40...+125 °C dla klasy 1).

Zalety i wady układów scalonych (z perspektywy projektu)

Zyskujemy wysoką gęstość funkcji, powtarzalność parametrów, zwykle niższy koszt BOM przy skali oraz mniejszą powierzchnię PCB. Mamy też lepszą kontrolę nad szumem i pasmem (krótkie ścieżki wewnętrzne). Ograniczeniami są dopuszczalne napięcia/prądy, wymagania termiczne i wrażliwość na layout (zwłaszcza mixed-signal i RF). W konserwacji i naprawach układy BGA/WLCSP komplikują serwis, a ryzyko EOL/zmian rewizji wymaga zarządzania łańcuchem dostaw i wersjonowaniem.

Dobre praktyki stosowania

W projektach stosujemy: konsekwentne odsprzęganie (MLCC blisko pinów zasilania, krótkie powroty prądu), podział planów masy i zasilania adekwatnie do funkcji, kontrolę impedancji przy szybkich interfejsach, poprawną sekwencję zasilania/resetu/bootu, uwzględnienie pinów programowania/diagnostyki (SWD/JTAG/UART), a także zgodność footprintu z rzeczywistą wersją obudowy i sposobem pakowania. W BOM-ach prowadzimy warianty (obudowa, taśma/szpula), a w krytycznych pozycjach utrzymujemy „drugi wybór” lub rodzinę zamienników o zgodnych obudowach/postfiksach. Informacje o rodzinach obudów, montażu THT vs SMD, metodach pakowania i standardach automotive z części ogólnej traktujemy jako checklistę przy zamówieniach i przygotowaniu produkcji.

3.3.1 Mikrokontrolery (MCU) i SoC

Mikrokontroler łączy rdzeń CPU, pamięć nieulotną i RAM oraz peryferia (timery, ADC, interfejsy komunikacyjne) na jednym krzemie; SoC rozszerza to o akceleratory i zaawansowane bloki multimedialne/komunikacyjne. Dobierając MCU/SoC, patrzymy na rdzeń i taktowanie, rozmiar pamięci, dostępne interfejsy (UART/SPI/I²C/USB/CAN/Ethernet), napięcia I/O, zapotrzebowanie mocy i klasy temperaturowe. Krytyczne są też ścieżka rozruchu i programowania (bootloader, SWD/JTAG), jakość narzędzi oraz długoterminowa dostępność. Zyskujemy

wysoką integrację i niski koszt systemu, ale akceptujemy ograniczenia wydajności, wrażliwość na zasilanie i ryzyko awarii danej rodziny.

3.3.2 FPGA i CPLD

FPGA to macierz programowalnej logiki z blokami LUT/FF, pamięciami BRAM, PLL/ MMCM, blokami DSP i często szybkimi transceiverami; CPLD zapewnia mniejszą, stabilniejszą logikę dla prostszych zadań sterujących. W doborze kluczowe są zasoby (LUT, FF, DSP), przepustowości I/O, standardy sygnałowe, jitter zegarów i budżet mocy. Stosujemy je, gdy potrzebujemy równoległości, precyzyjnego czasu lub niestandardowych protokołów. Zyskujemy elastyczność, płacimy większym poborem mocy, ceną i wyższymi wymaganiami EMC oraz layoutu.

3.3.3 Wzmacniacze operacyjne i komparatory

Wzmacniacz operacyjny to precyzyjny tor różnicowy z kompensacją częstotliwościową; komparator realizuje szybkie porównanie poziomów, często z histerezą. Dobierając, zwracamy uwagę na szумы, offset i jego dryft, pasmo i szybkość narastania, CMRR/PSRR, zakres napięć wejściowych/wyjściowych (rail-to-rail) oraz stabilność z obciążeniem pojemnościowym. Stosujemy je w kondycjonowaniu sygnałów, filtracji aktywnej, detekcji progowej. Ograniczeniem bywa wrażliwość na layout zasilania i kompensację pętli oraz konieczność poprawnego doboru obciążenia.

3.3.4 Referencje napięciowe i stabilizatory LDO

Referencje (bandgap, XFET) dostarczają stabilnego napięcia o niskim TC i niskim szumie; LDO wykorzystuje wzmacniacz błędów i tranzystor mocy do obniżenia napięcia z wysokim PSRR przy prostym torze mocy. Patrzymy na tolerancję, TC, szum i prąd referencji; w LDO na dropout, stabilność z daną ESR kondensatora, PSRR i prąd spoczynkowy. Stosujemy, gdy potrzebujemy czystego zasilania analogowego lub cichego zasilania logiki. Ograniczenia to sprawność przy dużym spadku napięcia i ważne projektowanie odsprężania oraz pętli masy.

3.3.5 Kontrolery przetwornic impulsowych i drivery mocy

Kontrolery buck/boost/flyback sterują tranzystorami mocy, realizują regulację PWM/PFM i zabezpieczenia; drivery bramek dopasowują poziomy i szybko

ładują/rozładowują pojemność bramek MOSFET/IGBT. Kluczowe są topologia, prąd/napięcie, sprawność, częstotliwość przełączania, zestaw zabezpieczeń (OCP/OVP/OTP) i zachowanie EMI. Stosujemy je przy większych mocach lub dużej różnicy napięć wejście–wyjście. Korzyścią jest wysoka sprawność, natomiast wymagamy rygorystycznego layoutu mocy, kontroli pętli prądowych i filtracji EMI.

3.3.6 Układy mieszane: ADC, DAC, PLL/oscyłatory

ADC/DAC integrują tor analogowy i logikę interfejsu; w ADC architektura (SAR, $\Delta\Sigma$, pipeline) determinuje ENOB, pasmo i opóźnienie. PLL i oscylatory scalone zapewniają stabilny zegar o niskim jitterze. W doborze liczą się ENOB/SINAD/SNR, INL/DNL, pasmo wejścia/wyjścia, jitter fazowy oraz sposób referencji. W praktyce stosujemy wydzieloną masę analogową, krótkie połączenia do referencji, filtrowanie zasilania i odsprzęganie przy pinach, aby utrzymać pełne parametry katalogowe.

3.3.7 Pamięci: nieulotne i ulotne

Do nieulotnych zaliczamy NOR/NAND Flash, EEPROM i FRAM; ulotne to SRAM i DRAM/LPDDR. Kryteria to pojemność i organizacja, interfejs (I²C/SPI/QSPI/równoległy/DDR), czasy dostępu, retencja i wytrzymałość zapisu. Flash i EEPROM ogranicza liczba cykli programowania oraz konieczność sekwencji zasilania, FRAM oferuje bardzo dużą trwałość kosztem pojemności. W DRAM dbamy o integralność sygnałową, terminacje i prowadzenie par różnicowych; w pamięciach szeregowym o integralność zegara i ochronę przed ESD.

3.3.8 Interfejsy i transceivery przewodowe

Transceivery CAN/LIN/RS-485, USB, Ethernet czy LVDS/MIPI zapewniają fizyczny poziom sygnału i odporność EMC. Dobieramy je według poziomów napięć, dopuszczalnego common-mode, zabezpieczeń ESD/latch-up, prądów w stanie domyślnym oraz zgodności ze standardem. W praktyce stosujemy odpowiednie terminacje, kontrolujemy impedancję ścieżek i odspręgamy przy pinach, a na wejściach zewnętrznych przewidujemy dodatkową ochronę (TVS, filtry).

3.3.9 Układy RF i moduły łączności bezprzewodowej

Transceivery, front-Andy (PA/LNA), przełączniki i syntezy częstotliwości integrują tor nadawczo-odbiorczy. Liczą się pasmo pracy, czułość i NF, moc wyjściowa, EVM, stabilność częstotliwości i wymagania certyfikacyjne. Stosujemy krótkie linie 50 Ω , dopasowanie przy złączu antenowym, solidną referencję zegarową i ekrany. Zyskujemy kompaktową łączność, ale projekt wymaga kontrolowanej impedancji, powtarzalnego stack-upu i dbałości o emisję niepożądaną.

3.3.10 Czujniki zintegrowane (MEMS, sensory środowiskowe, Halla)

Czujnik łączy element pomiarowy, kondycjonowanie, przetwornik A/C i interfejs cyfrowy. Sprawdzamy zakres i rozdzielczość, dokładność i kalibrację, dryft długoterminowy, czas odpowiedzi, wpływ temperatury i wibracji oraz budżet mocy. Stosujemy je, gdy liczy się gotowy sygnał cyfrowy i uproszczenie toru analogowego. Ograniczeniem bywa wrażliwość montażowa (orientacja, naprężenia płytki) i konieczność filtracji cyfrowej.

3.3.11 PMIC i zarządzanie energią systemu

PMIC łączy wielowyjściowe przetwornice, LDO, sekwencer, monitor zasilania i często ładowarkę baterii. Dobieramy według liczby i kolejności szyn, możliwości konfiguracji (I^2C /OTP), ograniczeń prądowych i wymagań termicznych obudowy. Stosujemy, aby uprościć zasilanie złożonych SoC/FPGA i zapewnić deterministyczny rozruch. Zysk to integracja i mniejsza powierzchnia, ceną jest zależność od konkretnej platformy i większe zagęszczenie mocy w jednym pakiecie.

3.3.12 Układy ochronne i „housekeeping”

Supervisory/reset, watchdogi, RTC, level-shiftery, eFuse i układy pomiaru prądu dopełniają system. Wybieramy je pod kątem progów, dokładności, opóźnień, odporności ESD i kompatybilności poziomów logicznych. Stosujemy, by podnieść niezawodność rozruchu, uprościć diagnostykę i zabezpieczyć linie zasilania oraz interfejsy zewnętrzne.

Układy scalone występują w obudowach: SMD: SOIC, SOP, TSSOP, SSOP, MSOP, QFP, TQFP, LQFP, DFN, QFN, LGA, PLCC, BGA, WLCSP; THT: DIP, CERDIP, CDIP.

- **Analogowe (np. wzmacniacze, regulatory)** – SMD: SOIC, TSSOP, MSOP, SOT-23-5/6; THT: DIP, CERDIP.
- **Cyfrowe (np. logika, mikrokontrolery)** – SMD: SOIC, TQFP, QFN, BGA; THT: DIP.
- **Pamięci** – SMD: TSOP, WLCSP, BGA; THT: DIP.
- **Układy specjalizowane (ASIC, FPGA)** – SMD: QFP, BGA, LGA.

3.4 Pozostałe elementy aktywne

3.4.1 Lampy elektronowe

Mimo dominacji półprzewodników, lampy elektronowe pozostają ważnym narzędziem w niszach, w których liczy się liniowość dużych sygnałów, odporność na przepięcia i promieniowanie oraz ekstremalna moc w.cz. Stosujemy je przede wszystkim w audio (wzmacniacze mocy, przedwzmacniacze), w nadajnikach i generatorach mikrofal (magnetron, klystron, TWT) oraz w aparaturze wysokiego napięcia i układach impulsowych (thyatrony, ignitrony).



Budowa i zasada działania

Typowa lampa to szczelne naczynie próżniowe (szkło lub ceramika/metal), w którym znajdują się: katoda żarzona (pośrednio lub bezpośrednio), jedna lub więcej siatek oraz anoda. Rozgrzana katoda emituje elektrony, a ich strumień sterujemy napięciem na siatce kontrolnej. Dodatkowe siatki pełnią role porządkujące: ekranująca ogranicza pojemność zwrotną, a tłumiąca redukuje emisję wtórną. W bańce znajduje się także getter wiążący resztki gazów; na

zewnątrz korzystamy z podstawek (octal, noval, itp.) i klasycznych wyprowadzeń. W lampach mikrofalowych sterowanie strumieniem łączymy z wnękami rezonansowymi i/lub polem magnetycznym, co pozwala generować i wzmacniać sygnały gigahercowe przy bardzo dużej mocy wyjściowej.

Najważniejsze typy praktyczne.

W prostownikach wysokiego napięcia stosujemy diody próżniowe (np. GZ34/5AR4, EZ81), które naturalnie ograniczają prąd rozruchowy i zapewniają „miękki start” zasilacza. W stopniach napięciowych wykorzystujemy triody małej mocy (np. ECC83/12AX7, ECC82/12AU7), gdzie kluczowe są parametry wzmacniające triody, transkonduktancja i rezystancja wewnętrzna – dobieramy je pod wymagany zapas wzmocnienia i charakter zniekształceń. W końcówkach mocy audio używamy tetrod strumieniowych i pentod (np. 6L6GC, EL34, EL84, KT88), pracujących w trybie pentodowym, ultraliniowym lub „zatriodowanym”, pojedynczo (SE) albo w parach przeciwsobnych (push-pull); wyjście dopasowujemy transformatorem głośnikowym. W technice impulsowej i HV spotykamy lampy gazowane – thyratrony do szybkiego przełączania dużych energii oraz ignitrony z katodą rtęciową. W mikrofalach niezmiennie królują magnetrony (m.in. 2,45 GHz w kuchenkach), klystrony i lampy o fali bieżącej (TWT), gdzie półprzewodniki mocy nadal nie dorównują skrajnej sprawności i mocom szczytowym.

Zalety i ograniczenia w praktyce.

Lampy bardzo dobrze tolerują przepięcia, promieniowanie i przeciążenia chwilowe; zachowują wysoką liniowość dla dużych amplitud i wchodzi w ograniczenie w sposób łagodny, co bywa pożądane w torach audio. W zakresie mikrofal zapewniają niedoścignione moce. Ceną jest wysoka moc tracona na żarzeniu, konieczność stosowania wysokich napięć zasilających, większe gabaryty i masa, podatność na mikrofonowanie, starzenie katody oraz mniejsza powtarzalność parametrów między egzemplarzami. Projektując urządzenie, uwzględniamy więc środki bezpieczeństwa HV i termiki, a także jakość transformatorów (zasilających, wyjściowych), które kształtują pasmo i zniekształcenia.

Wskazówki projektowe.

Zasilanie żarzenia prowadzimy skręconą parą (AC) z odniesieniem do masy lub zasilamy DC, jeśli walczymy z brumem; masy łączymy możliwie gwiazdowo. Napięcie anodowe filtrujemy RC/LC z rozładowaniem bleederami, a w układach audio opóźniamy podanie B+ do czasu rozgrzania katod. W stopniach końcowych dobieramy typ polaryzacji (self-bias/fixed-bias) do oczekiwanej mocy, kontroli prądu spoczynkowego i brzmienia; stosujemy rezystory siatkowe blisko nóżek lamp, aby zapobiec oscylacjom. Transformatory wyjściowe dobieramy po pasmo i impedancję obciążenia – w układach SE zwracamy uwagę na szczelinę w rdzeniu i prąd stały, w push-pull na symetrię uzwojeń i rozproszenie. W każdej konstrukcji HV zapewniamy bezpieczne odległości pełzania, osłony części pod wysokim potencjałem, rozładowanie kondensatorów oraz procedury serwisowe „jedną ręką”.

Zastosowania i dobór.

W audio sięgamy po triody/pentody o przewidywalnych parametrach i dostępnych odpowiednikach (np. ECC83 zastąpimy 12AX7, 5881 zastąpimy rodziną-6L6), pamiętając o dopuszczalnej mocy strat anody, prądach żarzenia i maksymalnych napięciach siatek. W urządzeniach HV/impulsowych prowadzimy selekcję pod kątem szybkości przełączania i odporności na powtarzalne udary. W technice mikrofal liczy się sprawność układu wnęk/obciążenia i skuteczne chłodzenie. W każdym z tych obszarów lampy utrzymują przewagę, gdy wymagamy bardzo dużej mocy, odporności na środowisko lub specyficznej nieliniowości toru.

3.4.2 Tyrystory (SCR)

Tyrystor zbudowany jest z czterech warstw p-n-p-n z elektrodami: anodą, katodą i bramką. Po podaniu impulsu prądowego na bramkę przechodzi w stan przewodzenia, a wyłącza się dopiero, gdy prąd anody spadnie poniżej prądu podtrzymania. Dzięki takiej strukturze uzyskujemy wysoką odporność napięciową i zdolność przewodzenia dużych prądów przy małych stratach w stanie włączenia, co wykorzystujemy w prostownikach sterowanych, układach miękkiego startu, zgrzewarkach, przekształtnikach DC oraz generatorach impulsów wysokiej energii. Ograniczeniem jest jednokierunkowość

przewodzenia oraz konieczność naturalnej lub wymuszonej komutacji, a także wrażliwość na strome narastanie napięcia i prądu (dv/dt , di/dt). W praktyce dobieramy napięcie V_{DRM}/V_{RRM} z zapasem, prąd $IT(RMS)$ i prąd udarowy $ITSM$ do warunków rozruchu, a parametry I_{GT} , I_L i I_H dostosowujemy do możliwości sterowania i charakteru obciążenia. Dla obciążeń indukcyjnych dodajemy tłumik RC (snubber) i ewentualnie dławik szeregowy, a w torze bramki zapewniamy impuls 2–3× większy od I_{GT} o odpowiednio stromym narastaniu. Przy wysokich energiach dbamy o chłodzenie i niski R_{th} , a w zasilaczach wysokiego napięcia stosujemy ekranowanie i krótkie połączenia, aby uniknąć niekontrolowanych wzbudzeń.

3.4.3 Triaki

Triak to w istocie dwa tyrystory połączone przeciwobnie na jednym chipie, z jedną wspólną bramką, dlatego przewodzi w obu kierunkach i idealnie nadaje się do regulacji mocy w sieci AC. Stosujemy go w ściemniaczach, sterowaniu nagrzewnicami, regulatorach obrotów silników komutatorowych, w przekaźnikach półprzewodnikowych oraz w prostych układach soft-start. Zaletą jest dwukierunkowość i prostota sterowania, a ograniczeniami — trudniejsza komutacja przy obciążeniach indukcyjnych, czułość na zakłócenia EMC oraz specyfika „kwadrantów” wyzwalania, którą musimy uwzględnić w doborze elementu i topologii bramki. W praktyce wybieramy triaki „snubberless” do silników i transformatorów albo dodajemy tłumik RC równolegle z triakiem i/lub MOV na linii, a do separacji i sterowania używamy optotriaków: z detekcją przejścia przez zero (np. do załączania grzałek bez regulacji fazowej) lub o losowej fazie (do ściemniania i regulacji). Parametry krytyczne to V_{DRM} , $IT(RMS)$, $ITSM$, I_{GT} oraz dV/dt i dI/dt przy wyłączeniu; termikę planujemy z zapasem, bo przewodzenie w obu półkulkach powoduje znaczną moc strat przy częściowym przewodzeniu. Aby ograniczyć brum i emisję zakłóceń, prowadzenie mas i przewodów do bramki wykonujemy możliwie krótko, a filtr EMI (LC) umieszczamy przed układem.

3.4.4 Diaki

Diak jest dwukierunkowym elementem przełączającym bez bramki, o strukturze przypominającej symetryczny układ p-n-p-n. Do momentu osiągnięcia napięcia przebicia zachowuje się jak izolator, po czym gwałtownie przechodzi w stan

przewodzenia z ujemną rezystancją dynamiczną. Wykorzystujemy go jako precyzyjne, symetryczne wyzwalanie triaka w regulatorach fazowych, gdzie ładuje się kondensator, a po osiągnięciu V_{BO} następuje szybki impuls w bramce triaka w obu połówkach sinusoidy. Zaletą jest powtarzalność progu i prostota, wadą — ograniczona moc i brak możliwości sterowania progami innym niż doborem typu (np. popularne DB3/DB4 o V_{BO} rzędu kilkudziesięciu woltów). W aplikacjach wymagających regulowanego progu częściej sięgamy po źródła prądowe, układy z komparatorem lub po PUT/UJT.

3.4.5 Transystory jednozłączowe (UJT) i PUT

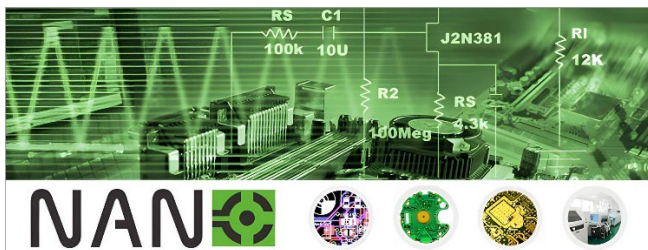
UJT składa się z pręta półprzewodnika typu n z dwiema elektrodami bazowymi (B1, B2) oraz złącza emiterowego p. Charakterystyka posiada obszar ujemnej rezystancji, dzięki czemu budujemy proste generatory piłokształtne, relaksacyjne i układy wyzwalania tyrystorów z niewielką liczbą elementów. W praktyce definiują nas dwa parametry: współczynnik podziału napięcia (intrinsic stand-off ratio) między B1–B2 oraz prąd emiterowy wyzwalania; wybieramy typ tak, by uzyskać pożądane napięcie/prąd „zapadu” i stabilność temperaturową. PUT (programmable UJT) jest złączem p-n-p-n z bramką sterowaną, które emuluje zachowanie UJT, ale umożliwia programowanie punktu wyzwalania napięciami na elektrodach — stosujemy go, gdy chcemy utrzymać prostotę relaksatora, a jednocześnie precyzyjnie ustawić próg. Rozwiązania te wypierają dziś układy scalone (np. 555, komparatory), jednak w układach HV i generatorach impulsów do wyzwalania SCR nadal sprawdzają się dzięki odporności i małej liczbie części.

Pozostałe elementy aktywne występują w obudowach: SMD: SOT, DPAK, D2PAK, DFN/QFN; THT: TO, DIP, SIP.

- **Tyrystory / triaki** – SMD: SOT-223, DPAK; THT: TO-220, TO-92.
- **Stabilizatory napięcia** – SMD: SOT-223, DFN; THT: TO-220, TO-92.
- **Drivery, regulatory, przetwornice scalone** – SMD: SOIC, DFN/QFN; THT: DIP.

Nanotech Elektronik jest profesjonalnym producentem elektroniki

- Produkcja obwodów drukowanych
- Komponenty elektroniczne
- Montaż SMT i THT
- Projektowanie urządzeń
- Prototypy
- Serie produkcyjne



Nasze możliwości technologiczne w zakresie montażu

Produkcja i montaż obwodów drukowanych	
Minimalna ilość zamówienia	od 1 sztuki
Maksymalny rozmiar PCB (X x Y)	automatyczny montaż SMT - 610 mm x 510 mm; montaż THT - bez ograniczeń
Minimalny rozmiar PCB (X x Y)	automatyczny montaż SMT - 50 mm x 50 mm; montaż THT - bez ograniczeń
Montaż podzespołów SMD	
Zakres rozmiarów podzespołów	0,4 mm x 0,2 mm (01005) do 45 mm x 100 mm
Wysokość podzespołów (maks)	15 mm
Rodzaje podzespołów	Chips: 01005, 0201, 0402, 0603, 0805, 1206, 1210, 1812, 2010, 2225, 2512 IC: PLCC18-PLCC84, LCC20-LCC84, SO, HSOP, SOJ18-SOJ44, MSOP8-MSOP10, SSOP8-SSOP64, HSOP20-HSOP44, TSSOP8-TSSOP80, TSOP28-TSOP56, TQFP32-TQFP176, LQFP32-LQFP256, QFP44-QFP304, CSP40-CSP56 (0,5), BGA46-BGA100 (0,75-0,8), LBGA48-LBGA280 (0,75-0,8), BGA81-BGA324 (1,0) up to LBGA1936 (1,0), BGA208(1,27) up to LBGA1225(1,27), BGA169 (1,5) up to LBGA 400, CBGA121 - CBGA1089
Dokładność montażu (X, Y)	50µm for chips 01005, 0201, 0402
	75µm for chips > 0402, SOIC
	30µm for QFPs

Jakość produktu jest zapewniona przez wielopoziomowy system kontroli na każdym etapie cyklu produkcyjnego. Wyprodukowany produkt będzie w pełni zgodny z dostarczonymi wymaganiami technicznymi i normami międzynarodowego stowarzyszenia producentów elektroniki (IPC).