

Elektronika

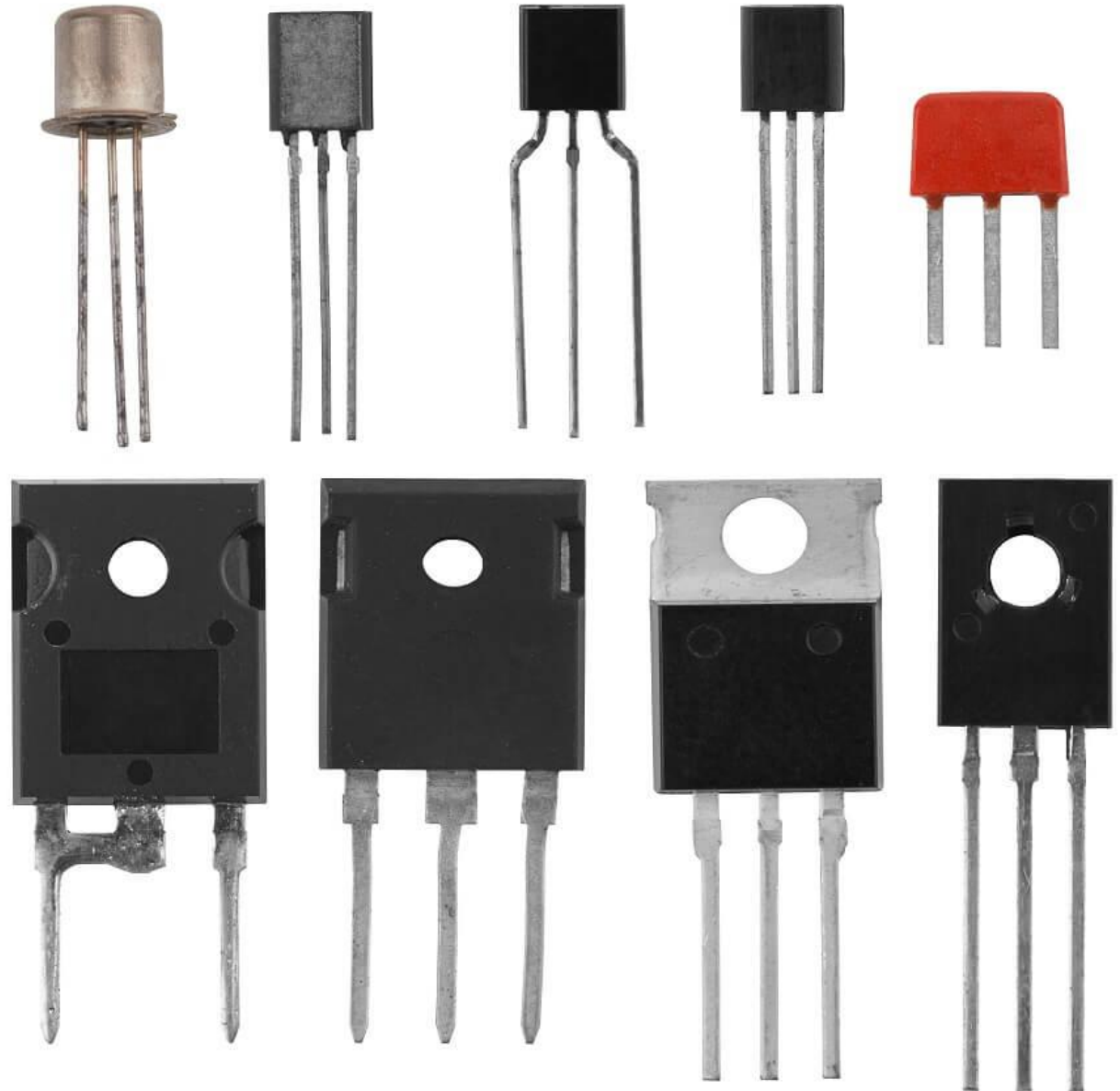
Podstawowe elementy elektroniki - TRANZYSTORY

Tranzystory

Tranzystory to elementy półprzewodnikowe mające na ogół trzy wyprowadzenia.

Obudowy są różne, zależnie od parametrów i przeznaczenia elementów.

Tranzystor jest elementem należącym do grupy elementów aktywnych, to znaczy takich, w których możliwe jest sterowanie prądem płynącym przez taki element i w konsekwencji wzmacnianie sygnałów docierających do jego wejścia.



Na rynku dostępne są następujące rodzaje tranzystorów:

- Tranzystory bipolarne z podziałem na dwie grupy:
 - typu NPN,
 - typu PNP,
- tranzystory unipolarne, inaczej zwane polowymi lub skrótowo FET-ami, z podziałem na dwie grupy:
 - tranzystory polowe złączowe JFET,
 - tranzystory polowe z izolacją bramki MOSFET - często też nazywane tranzystorami polowymi z metalizacją bramki.

Po co nam tranzystor?

W najprostszym ujęciu tranzystor pozwala użyć małego sygnału sterującego do kontrolowania większego prądu.

Na przykład mikrokontroler albo czujnik może wygenerować sygnał logiczny 5 V, ale nie może bezpośrednio zasilić przekaźnika, cewki czy silnika.

Potrzebny jest element pośredniczący.

I właśnie taką rolę często pełni tranzystor.

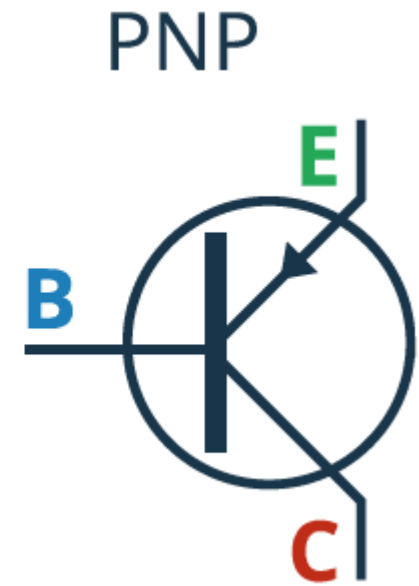
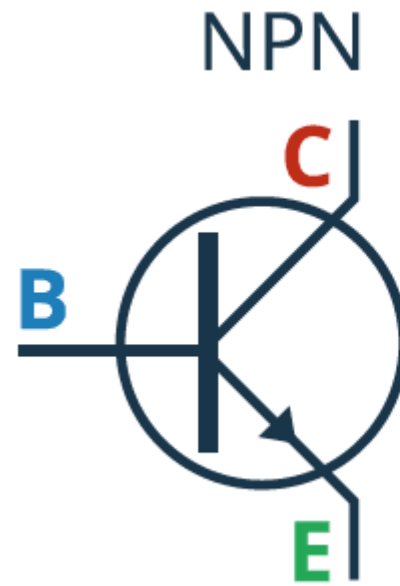
Zatem - **mały sygnał steruje większym prądem lub mocą:**

- mikrokontroler → przekaźnik,
- czujnik → dioda LED / buzzer,
- układ logiczny → silnik.

Tranzystor bipolarny (BJT) – podstawy

W tranzystorach bipolarnych wyprowadzenia mają następujące nazwy:

- emiter (oznaczany na schematach jako E),
- baza (oznaczana jako B),
- kolektor (oznaczany jako C lub K).



Tranzystor jako sterowany zawór

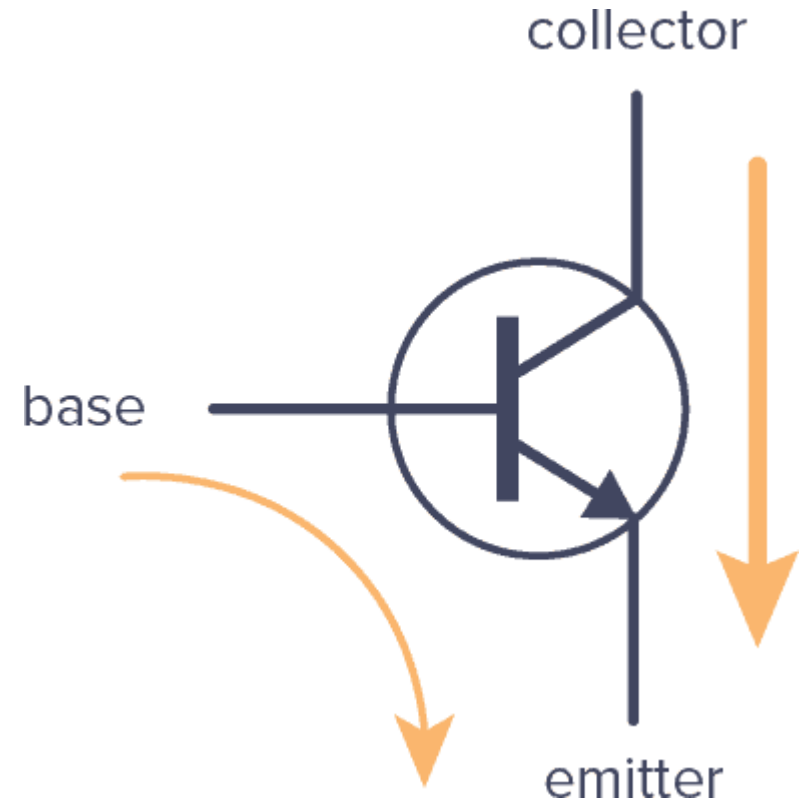
baza = wejście sterujące,

kolektor–emiter = główny tor prądu,

mały prąd bazy steruje większym prądem kolektora.

Na poziomie intuicji można potraktować tranzystor jak sterowany zawór.

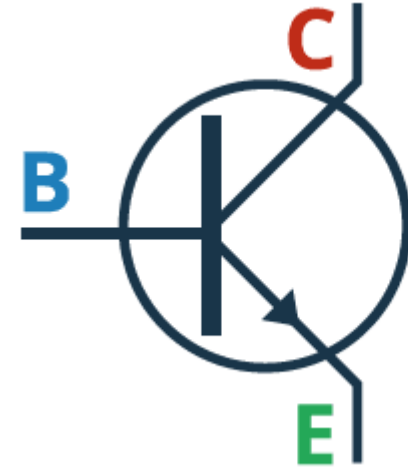
Sygnał podany na bazę wpływa na to, czy i jak popłynie prąd przez główny tor tranzystora, czyli między kolektorem a emiterem. Kluczowe jest to, że w tranzystorze bipolarnym mały prąd bazy może sterować większym prądem kolektora.



Prądy w tranzystorze

Między prądami w tranzystorze zachodzi prosta zależność wynikająca z prawa Kirchhoffa, tzn. prąd emitera jest sumą prądu bazy i prądu kolektora:

$$I_E = I_B + I_C$$



Ponadto, w uproszczonym modelu, tranzystor charakteryzuje się stałym stosunkiem prądu bazy do prądu kolektora:

$$I_C \approx \beta \cdot I_B$$

Jak widać prąd kolektora jest zawsze znacznie większy od prądu bazy.

Stosunek obydwu wartości nazywamy wzmocnieniem prądowym i oznaczamy symbolem β (lub h_{FE}).

Parametr ten przyjmuje zazwyczaj wartości z przedziału od 10 do 300.

Prąd I_C jest zatem prawie równy prądowi I_E - typowo stanowi 98%–99,9% prądu emitera, a różnica to prąd bazy.

W praktyce β zależy od konkretnego tranzystora, temperatury i warunków pracy.

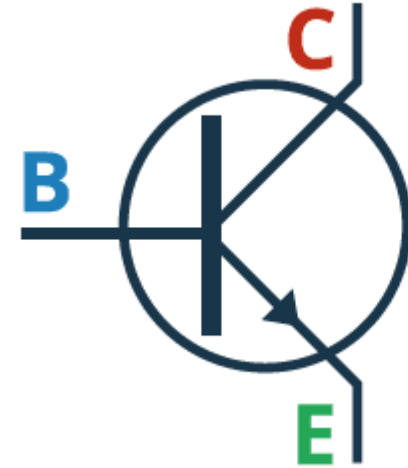
Do prostych obliczeń można używać tego modelu, ale trzeba pamiętać, że jest on uproszczony.

Złącze baza–emiter

Żeby tranzystor zaczął przewodzić, złącze baza–emiter musi być spolaryzowane w kierunku przewodzenia.

W uproszczonym modelu przyjmujemy, że napięcie baza–emiter wynosi wtedy około 0,6 do 0,7 V.

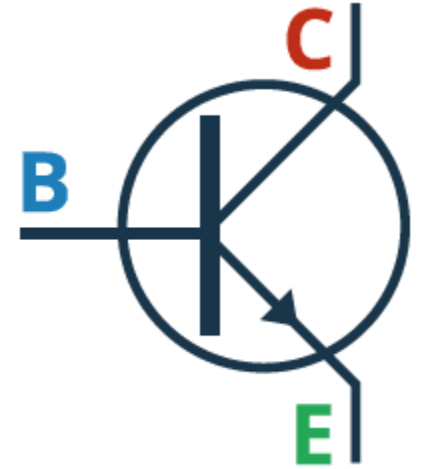
Trzeba podkreślić, że nie jest to sztywny próg!



Stany pracy tranzystora

Tranzystor bipolarny może znajdować się w trzech stanach pracy:

- Stan odcięcia – jeśli napięcie baza-emiter jest mniejsze od ok. 0,7 V, prąd w bazie nie płynie, a rezystancja złącza kolektor-emiter wskazuje na warunki zbliżone do rozwarcia obwodu, więc tranzystor nie przewodzi.

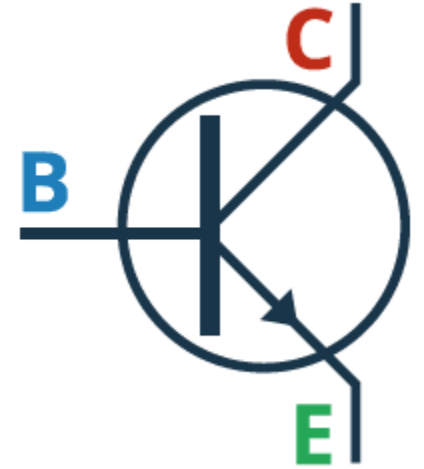


„wyłączenie”

Stany pracy tranzystora

Tranzystor bipolarny może znajdować się w trzech stanach pracy:

- Stan aktywny – jeśli napięcie baza-emiter wynosi co najmniej ok. 0,7 V, przez bazę płynie prąd, a rezystancja złącza kolektor-emiter ulega znacznemu zmniejszeniu.
- Wartość prądu kolektora w stanie przewodzenia jest proporcjonalna do prądu bazy. Stosunek prądu kolektora do prądu bazy określa wzmacnienie prądowe tranzystora. W takim trybie działania tranzystor pełni funkcję prostego wzmacniacza prądu.

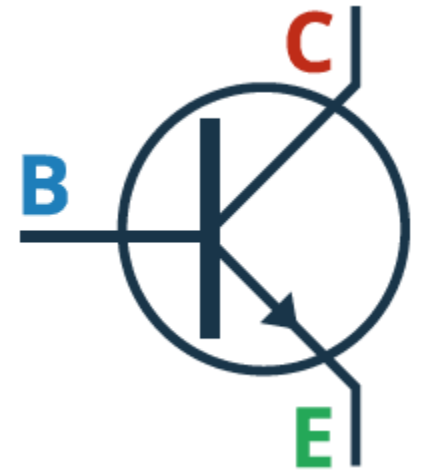


„wzmacnianie”

Stany pracy tranzystora

Tranzystor bipolarny może znajdować się w trzech stanach pracy:

- Stan nasycenia – jeśli napięcie baza-emiter jest większe niż ok. 0,7 V, to prąd bazy zostaje odpowiednio podniesiony. Wówczas rezystancja złącza kolektor-emiter jeszcze bardziej maleje.
- W tym przypadku wartość prądu płynącego przez kolektor jest najwyższa. Taki tranzystor zachowuje się jak przełącznik, który zwiera obwód przez minimalną możliwą rezystancję złącza kolektor-emiter.



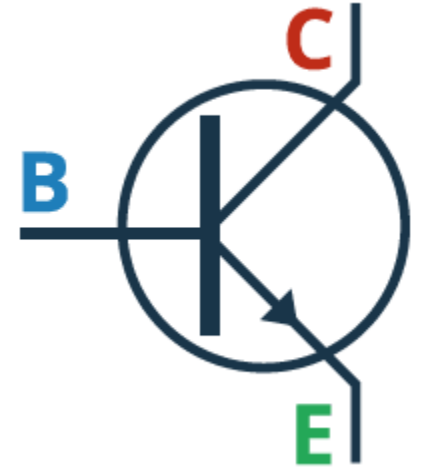
„kluczowanie”

Stany pracy tranzystora

Na ten moment najważniejsze są odcięcie i nasycenie, bo właśnie one odpowiadają stanom OFF i ON w prostym sterowaniu obciążeń.

Podstawowym zastosowaniem praktycznym będzie użycie tranzystora jako klucza.

Jeśli nie podamy odpowiedniego sterowania na bazę, tranzystor pozostaje zamknięty i prąd przez obciążenie praktycznie nie płynie. Jeśli baza zostanie odpowiednio wystawiona, tranzystor przejdzie do stanu przewodzenia i przez obciążenie popłynie prąd. W ten sposób mały sygnał steruje większym obciążeniem.



Jest to podstawa działania ogromnej liczby prostych układów sterujących.

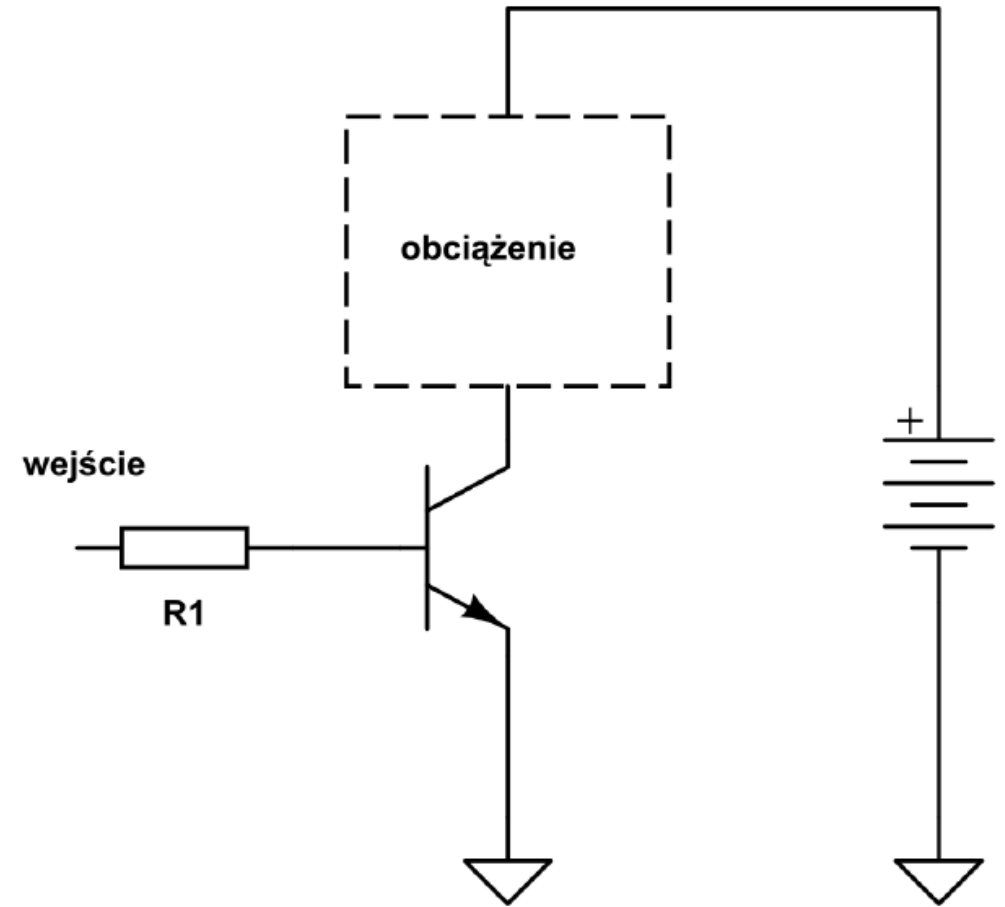
KLUCZ TRANZYSTOROWY

Standardowy układ pracy tranzystora bipolarnego, w którym służy do sterowania obciążenie pobierającym więcej prądu niż można bezpiecznie dostarczyć z wejścia.

- Zasada działania:

Jeżeli do wejścia dołączone zostanie napięcie większe niż napięcie przewodzenia złącza baza-emiter tranzystor zacznie przewodzić i przez obciążenie może zacząć płynąć prąd.

Jeżeli do wejścia zostanie dołączone napięcie niższe niż 0,6 V tranzystor zostaje zatkany i przez obciążenie nie płynie prąd.



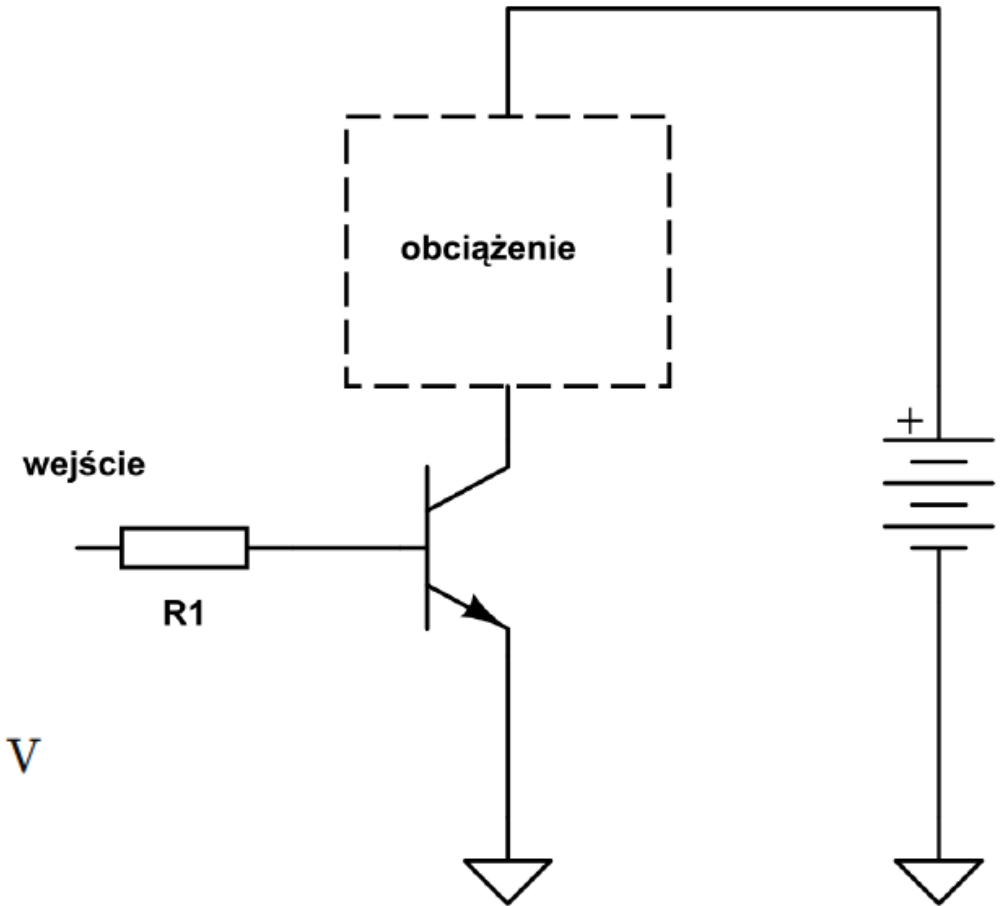
KLUCZ TRANZYSTOROWY

Dlaczego potrzebny jest rezystor bazy?

- ogranicza prąd bazy,
- chroni źródło sterujące,
- chroni tranzystor,
- pozwala ustalić odpowiedni prąd sterujący

$$I_B \approx \frac{U_{we} - U_{BE}}{R_B}$$

$$U_{BE} \approx 0,6 - 0,7 \text{ V}$$



*Rezystor bazy nie jest dodatkiem opcjonalnym.
W kluczu tranzystorowym jest elementem koniecznym!*

KLUCZ TRANZYSTOROWY

Jak dobrać rezystor bazy?

1. Wyznaczyć prąd obciążenia $I_L \approx I_C$.
2. Obliczyć minimalny wymagany prąd bazy:

$$I_B = I_L / \beta$$

Stąd:

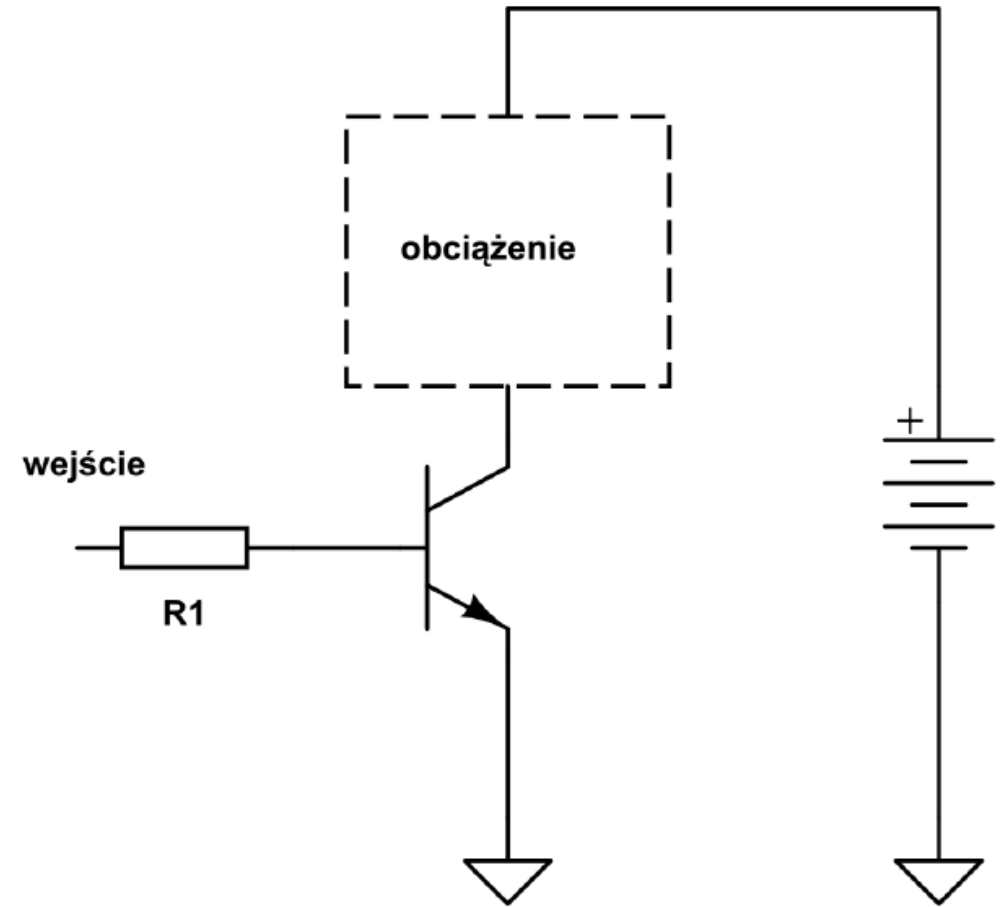
- Maksymalna wartość $R_1 = (U_{we} - U_{BE}) / I_B$

Natomiast minimalna wartość $R_1 = (U_{we} - U_{BE}) / I_{wemax}$

I_{wemax} to maksymalny prąd, jaki może dostarczyć układ sterujący do bazy tranzystora.

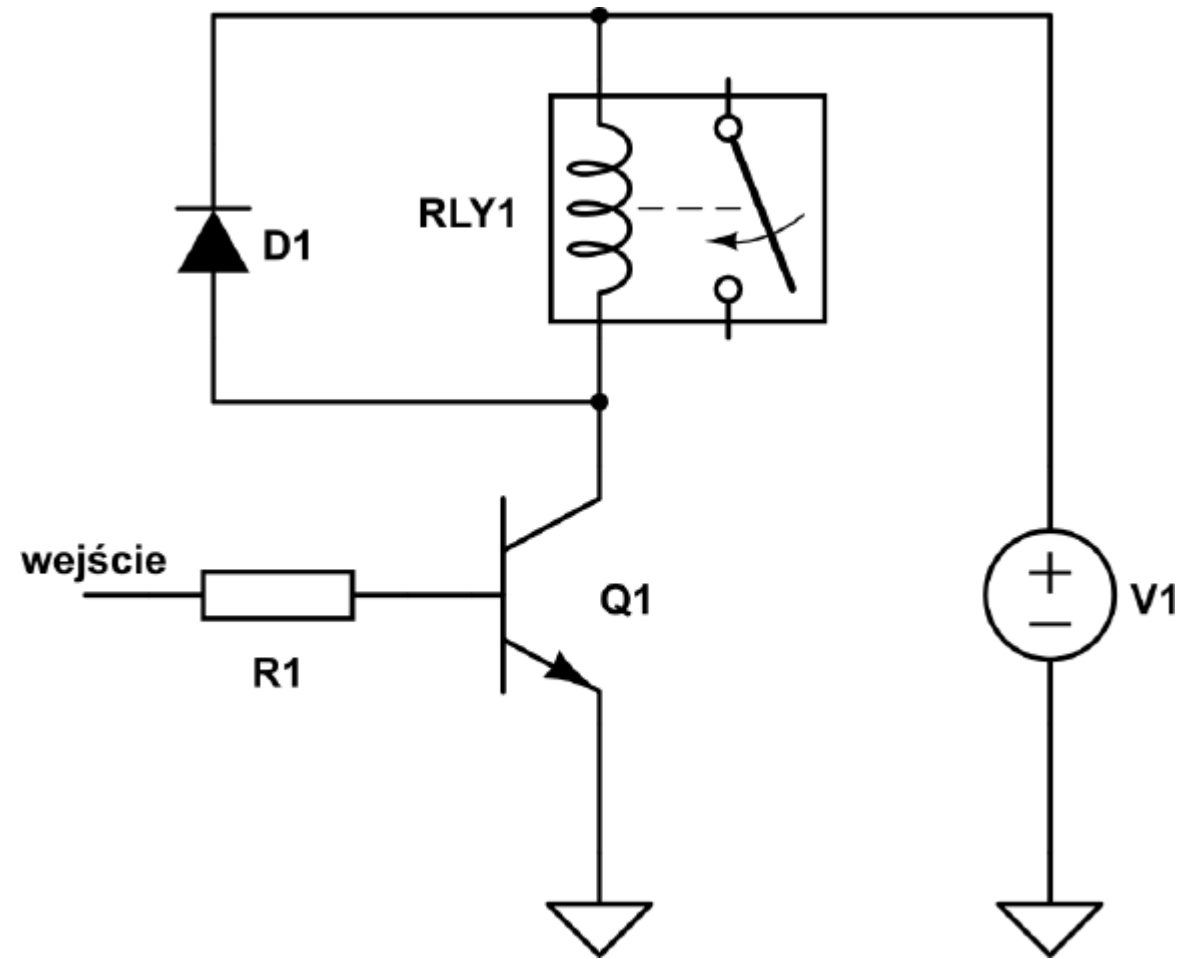
Podsumowując:

$$\frac{U_{we} - U_{BE}}{I_{we,max}} \leq R_B \leq \frac{U_{we} - U_{BE}}{I_B}$$



UKŁAD STEROWANIA CEWKĄ PRZEKAŹNIKA

- Przełącznik ma cewkę, którą trzeba zasilić odpowiednim prądem, a jednocześnie często chcemy sterować nią z delikatniejszego układu elektronicznego (np. z portu mikrokontrolera).
- Tranzystor rozwiązuje ten problem.
- Na bazę podajemy mały sygnał sterujący, a tranzystor przełącza prąd płynący przez cewkę.
- W ten sposób można z poziomu elektroniki niskomocowej załączać obwody wykonawcze.

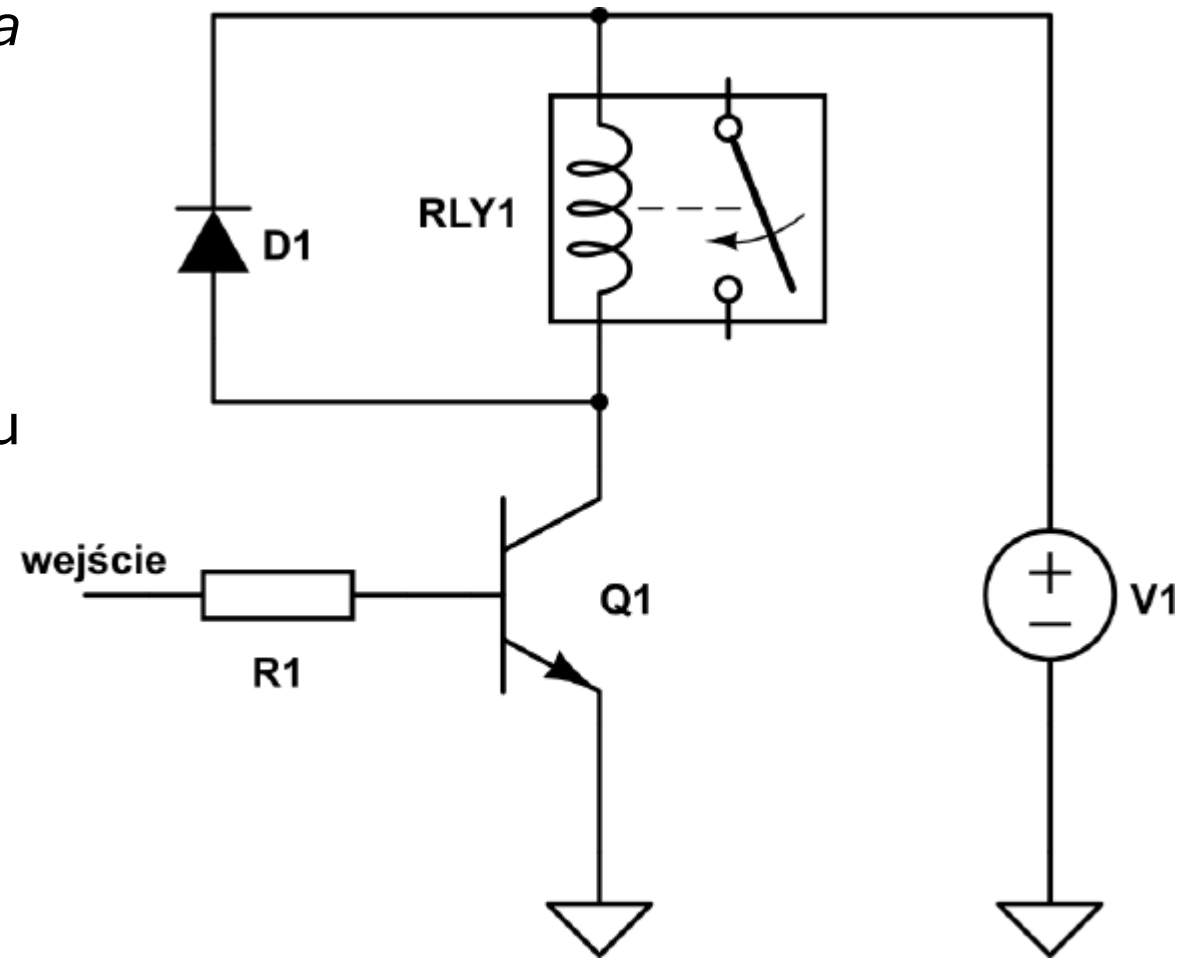


UKŁAD STEROWANIA CEWKĄ PRZEKAŹNIKA

W zasadzie jest to szczególny przypadek klucza tranzystorowego, w którym obciążeniem jest cewka przekaźnika...

Po co dioda?

- Cewka jest elementem indukcyjnym, a to oznacza, że nie lubi gwałtownej zmiany prądu
- Gdy wyłączamy tranzystor, energia zgromadzona w polu magnetycznym cewki musi się gdzieś rozładować.
- Jeśli nie wstawimy diody zabezpieczającej, może pojawić się wysoki impuls napięciowy, który uszkodzi tranzystor.
- Dioda równoległa do cewki zapewnia bezpieczną drogę rozładowania tej energii.



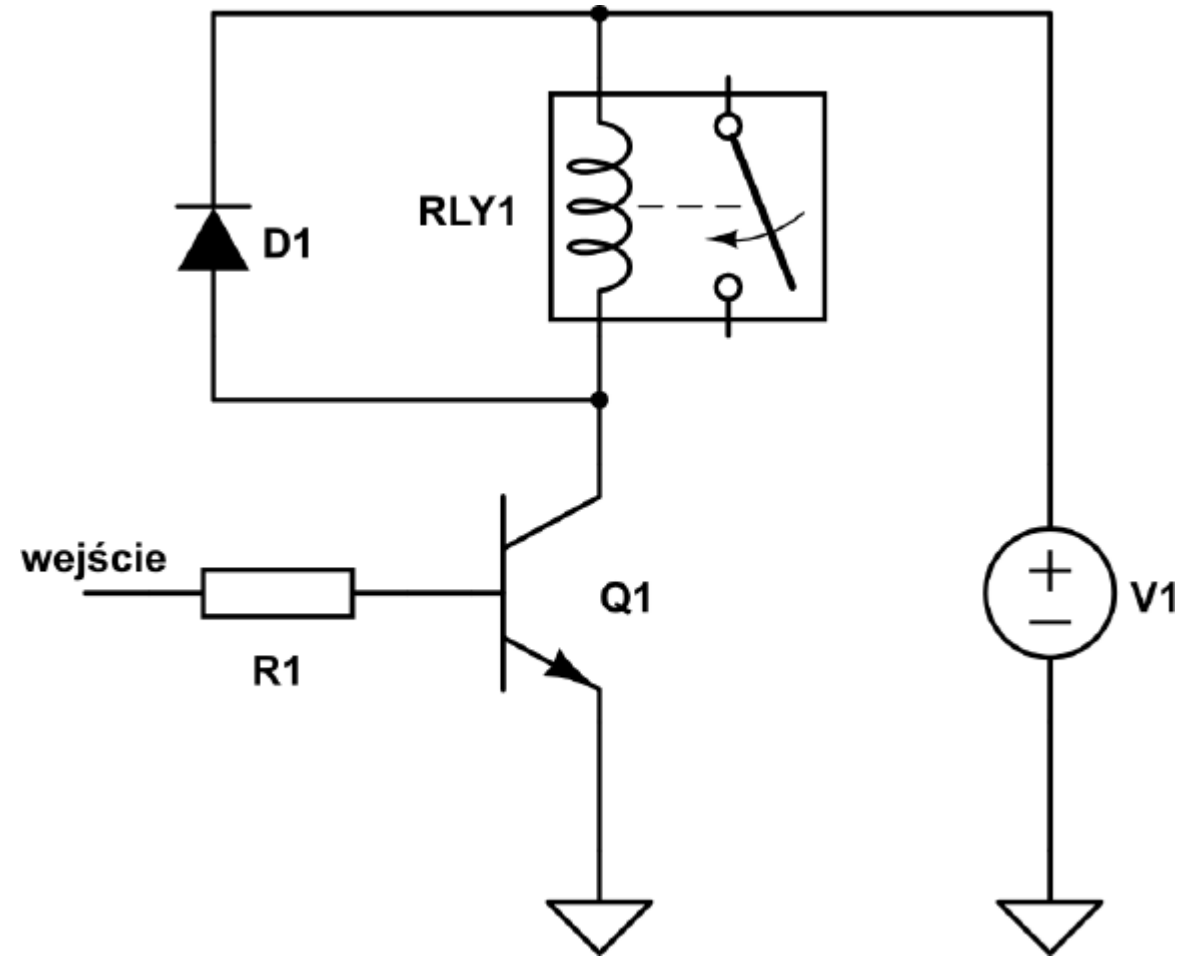
PROJEKT UKŁADU

Należy dobrać 3 elementy:

- diodę D1,
- tranzystor Q1,
- rezystor R1.

Założenia:

- napięcie załączania przekaźnika = 12 V,
- rezystancja cewki przekaźnika = 50 Ohm,
- poziom stanu wysokiego = 5V,
- wydajność prądowa wyjścia cyfrowego = 20mA.

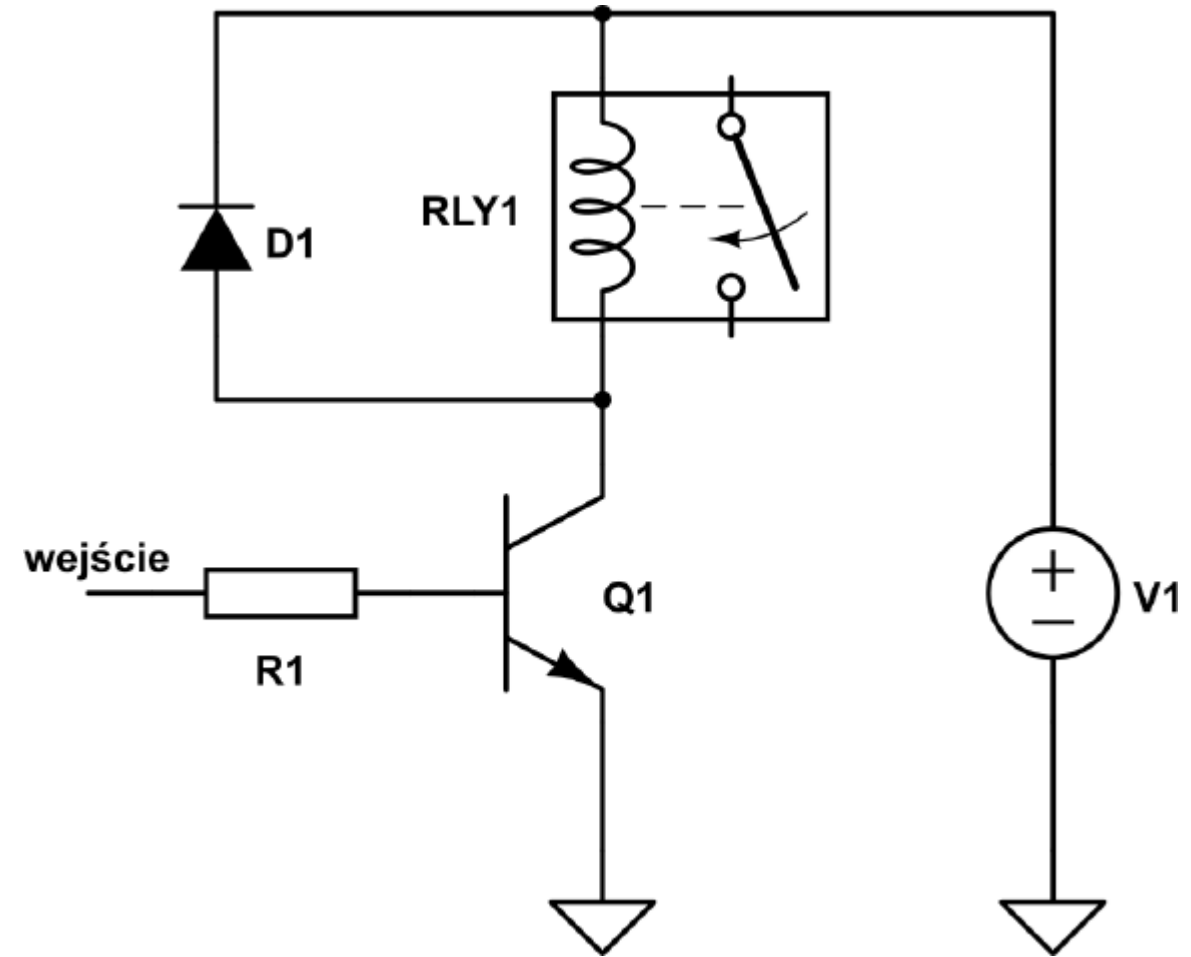


Założenia:

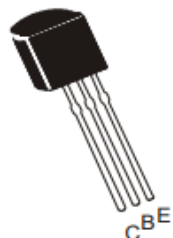
- napięcie załączania przekaźnika = 12 V,
- rezystancja cewki przekaźnika = 50 Ohm,
- poziom stanu wysokiego = 5V,
- wydajność prądowa wyjścia cyfrowego = 20mA.

Dobór tranzystora:

- prąd cewki przekaźnika = $12\text{ V} / 50\text{ Ohm} = 240\text{ mA}$...



NPN SILICON PLANAR EPITAXIAL TRANSISTORS



BC182, A, B
BC183, A, B, C
BC184, B, C

TO-92
Plastic Package
For Lead Free Parts, Device
Part # will be Prefixed with
"T"

Amplifier Transistors

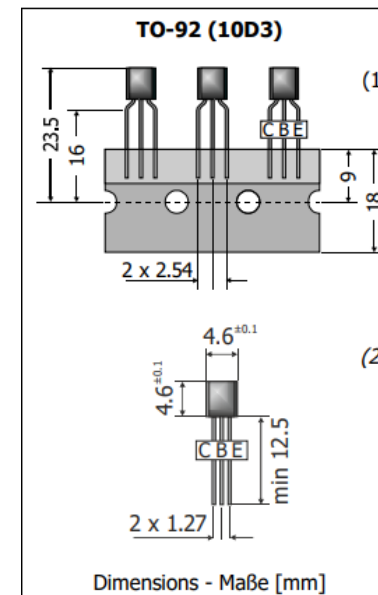
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_a=25^\circ\text{C}$)

DESCRIPTION	SYMBOL	BC182	BC183	BC184	UNITS
Collector Emitter Voltage	V_{CE0}	50	30	30	V
Collector Base Voltage	V_{CBO}	60	45	45	V
Emitter Base Voltage	V_{EBO}	6.0			V
Collector Current Continuous	I_C	100			mA
Power Dissipation at $T_a=25^\circ\text{C}$	P_D	350			mW
Derate Above 25°C		2.8			mW/ $^\circ\text{C}$
Power Dissipation at $T_c=25^\circ\text{C}$	P_D	1.0			W
Derate Above 25°C		8.0			mW/ $^\circ\text{C}$
Operating And Storage Junction Temperature Range	T_j, T_{stg}	- 55 to +150			$^\circ\text{C}$

BC337 ... BC338

BC337 ... BC338			$I_C = 800 \text{ mA}$		$V_{CE0} = 25...45 \text{ V}$	
General Purpose NPN Transistors			$h_{FE} = 160/250/400$		$P_{tot} = 625 \text{ mW}$	
Universal-NPN-Transistoren			$T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$			

Version 2017-02-09



Typical Applications

Signal processing,
Switching, Amplification
Commercial grade ¹⁾

Features

General Purpose
Three current gain groups
Compliant to RoHS, REACH,
Conflict Minerals ¹⁾

Mechanical Data ¹⁾

- (1) Taped in ammo pack
(Raster 2.54)
(2) On request: in bulk
(Raster 1.27, suffix "BK")

Weight approx. 0.01 g
Case material UL 94V-0
Solder & assembly conditions 260°C/10s
MSL N/A

Typische Anwendungen

Signalverarbeitung,
Schalten, Verstärken
Standardausführung ¹⁾

Besonderheiten

Universell anwendbar
Drei Stromverstärkungsklassen
Konform zu RoHS, REACH,
Konfliktmineralien ¹⁾

Mechanische Daten ¹⁾

- (1) Gegurtet in Ammo-Pack
(Raster 2.54)
(2) Auf Anfrage: Schüttgut
(Raster 1.27, Suffix "BK")

Gewicht ca. 0.01 g
Gehäusematerial UL 94V-0
Löt- und Einbaubedingungen 260°C/10s
MSL N/A

Current gain groups Stromverstärkungsgruppen		Recommended complementary PNP transistors Empfohlene komplementäre PNP-Transistoren
BC337-16 BC337-25 BC337-40	BC338-16 BC338-25 BC338-40	BC327 ... BC328

Jak widać, np.

BC337 jest OK, bo jego $I_{C_{max}} = 800 \text{ mA}$,

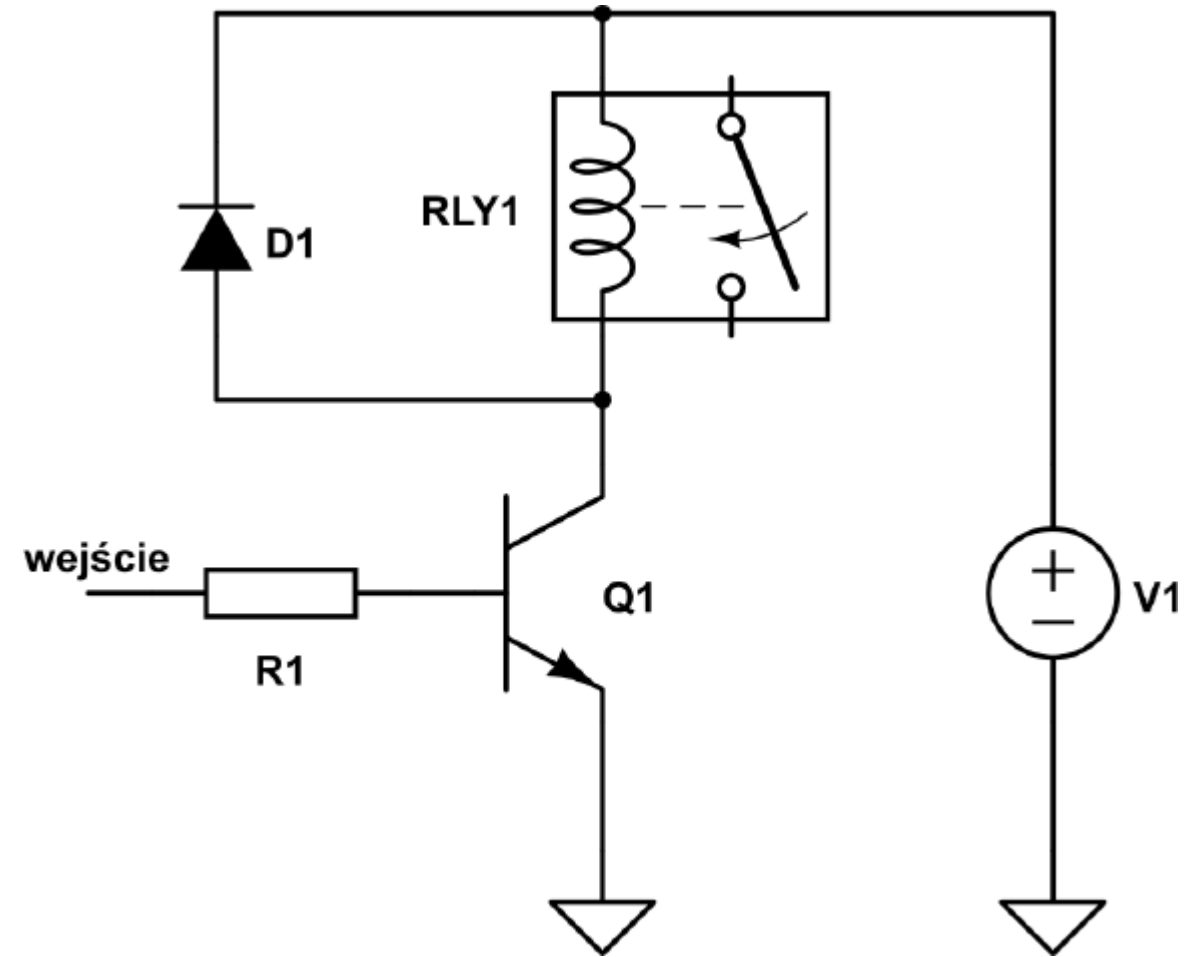
BC182 to zły wybór, bo jego $I_{C_{max}} = 100 \text{ mA}$.

Założenia:

- napięcie załączania przekaźnika = 12 V,
- rezystancja cewki przekaźnika = 50 Ohm,
- poziom stanu wysokiego = 5V,
- wydajność prądowa wyjścia cyfrowego = 20mA.

Dobór diody:

- maksymalny prąd chwilowy (IFSM) musi przewyższać prąd cewki przekaźnika, a napięcie wsteczne (VDC) przewyższać napięcie przełączania



MAXIMUM RATINGS (T _A = 25 °C unless otherwise noted)									
PARAMETER	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNIT
Maximum repetitive peak reverse voltage	V _{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS voltage	V _{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC blocking voltage	V _{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum average forward rectified current 0.375" (9.5 mm) lead length at T _A = 75 °C	I _{F(AV)}	1.0							A
Peak forward surge current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	I _{FSM}	30							A
Non-repetitive peak forward surge current square waveform T _A = 25 °C (fig. 3)	t _p = 1 ms	I _{FSM}	45						A
	t _p = 2 ms		35						
	t _p = 5 ms		30						
Maximum full load reverse current, full cycle average 0.375" (9.5 mm) lead length T _L = 75 °C	I _{R(AV)}	30							μA
Rating for fusing (t < 8.3 ms)	I ² t (1)	3.7							A ² s
Operating junction and storage temperature range	T _J , T _{STG}	-50 to +150							°C

więc np.

1N4001 jest OK, bo jej $I_{FSM} = 30\text{ A}$, a $V_{DC} = 50\text{ V}$.

Założenia:

- napięcie załączania przekaźnika = 12 V,
- rezystancja cewki przekaźnika = 50 Ohm,
- poziom stanu wysokiego = 5V,
- wydajność prądowa wyjścia cyfrowego = 20mA.

Dobór rezystora (już dla BC337):

Obliczenie minimalnego prądu bazy:

$h_{FE}=60$ (dla BC337), prąd cewki przekaźnika = 240 mA, więc:

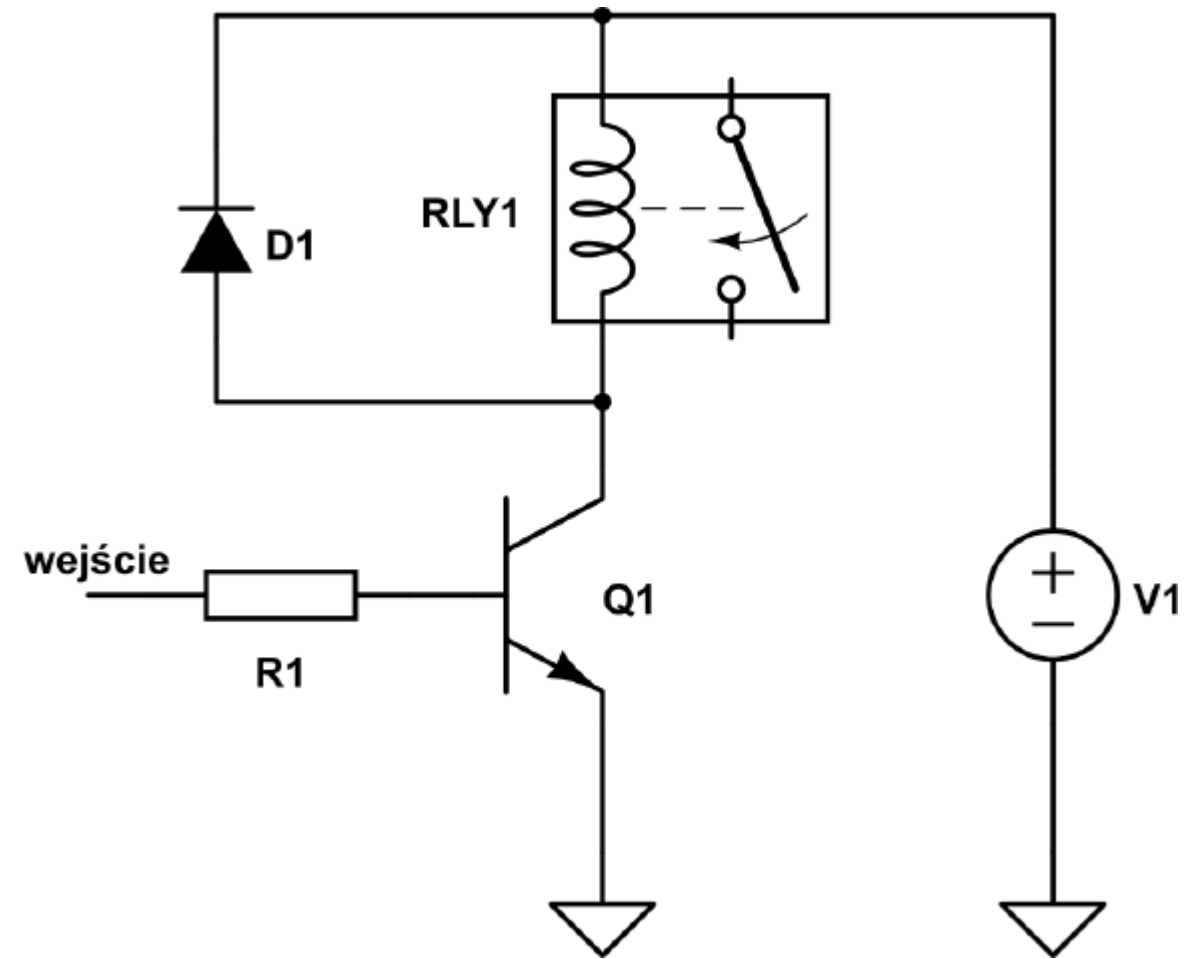
$$240\text{mA} / 60 = 4\text{mA},$$

Napięcie na rezystorze to $5\text{V} - 0,7\text{V} = 4,3\text{V}$.

Zatem:

$$R_{1\text{max}} = 4,3\text{V} / 4 \text{ mA} = 1,075 \text{ kOhm},$$

$$R_{1\text{min}} = 4,3\text{V} / 20 \text{ mA} = 0,215 \text{ kOhm}.$$



Ważne uwagi do układów kluczujących

- Do kluczowania w praktyce nie liczymy R_b z katalogowego h_{FE} , tylko przyjmujemy tzw. $\beta_{forced} \approx 5...10$.

To gwarantuje nasycenie przy rozrzutach i w różnej temperaturze pracy.

- Zwykła dioda równoległa spowalnia zwolnienie przełącznika (prąd wygasa wolniej). Dla szybszego wyłączenia – np. dioda Schottky’ego.

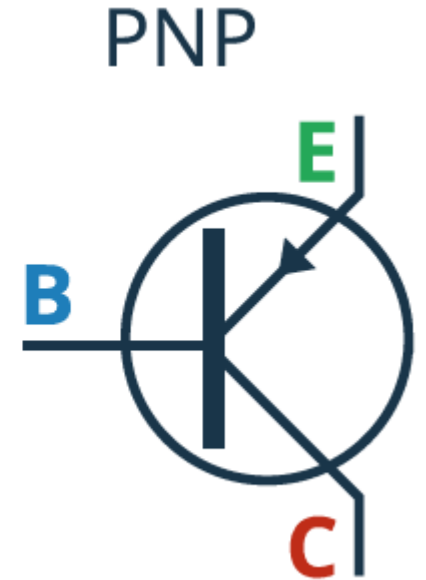
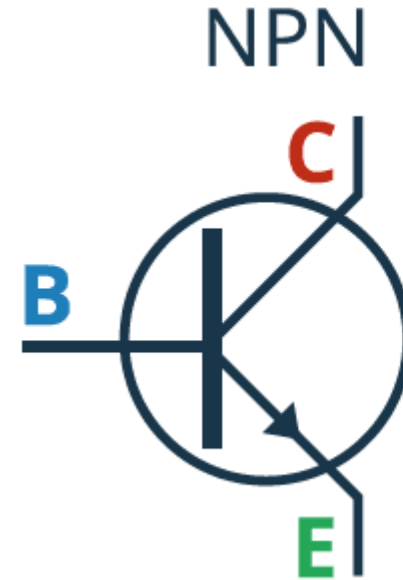
Najczęstsze błędy

- Brak rezystora bazy.
- Brak diody przy cewce.
- Pomylenie kolektora z emiterem.
- Za duży prąd obciążenia.
- Traktowanie β jako stałej idealnej.

Porównanie NPN i PNP

Tranzystor PNP stanowi lustrzane odbicie tranzystora NPN.

- W prostych układach NPN bywa często używany jako klucz dolny, czyli umieszczony między obciążeniem a masą.
- PNP może pracować jako klucz górny, czyli po stronie dodatniego zasilania.



Inne układy tranzystorowe

ŹRÓDŁO PRĄDOWE

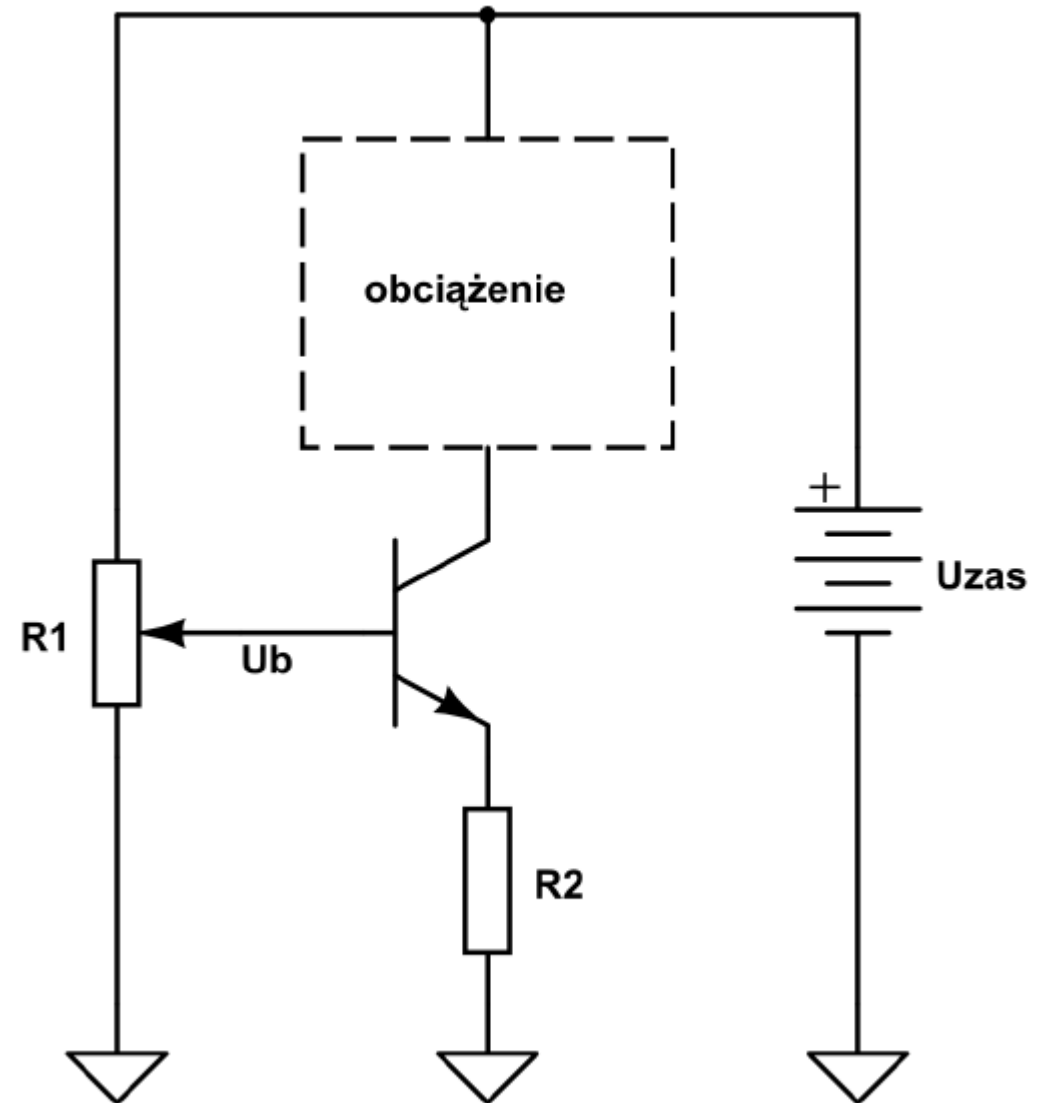
- Bardzo prosty układ, który pozwala ustawić pożądane natężenie prądu obciążenia.
- Przydaje się w przypadku sterowania elementami, dla których należy stabilizować nie napięcie ale natężenie prądu. Przykładem takiego obciążenia są np. diody LED.

Zasada działania:

Ustawiając odpowiednie napięcie na bazie tranzystora za pomocą potencjometru R_1 i wartość rezystora R_2 możemy ustalić odpowiednią wartość natężenia prądu obciążenia zgodnie ze wzorem:

$$I_L = (U_b - 0,6 \text{ V}) / R_2$$

I_L - prąd obciążenia



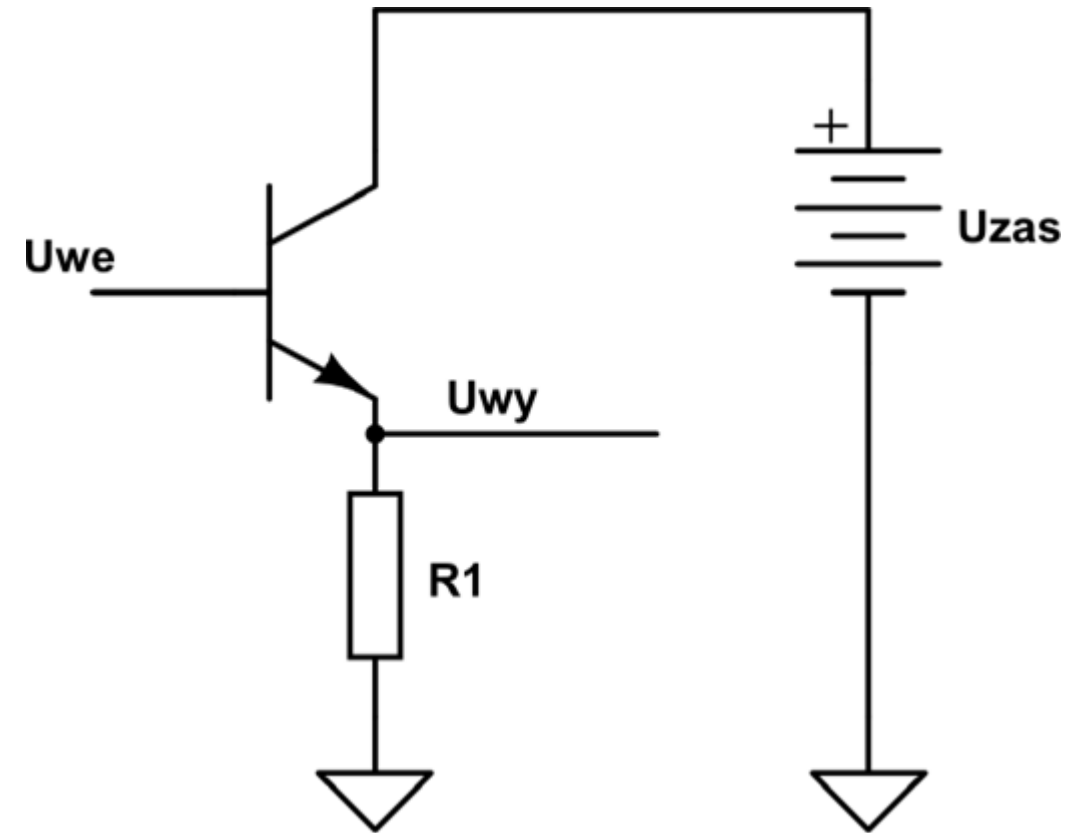
WTÓRNIK EMITEROWY

- Ten układ pozwala ustalić napięcie U_{wy} na obciążeniach, które pobierają więcej prądu niż można bezpośrednio dołączyć np. do wyjścia wzmacniacza operacyjnego.
- Dzięki wzmocnieniu prądowemu układ nie obciąża źródła dołączonego do wejścia tak bardzo jak bezpośrednie dołączenie obciążenia.
- Zasada działania:

Napięcie między bazą, a emiterem tranzystora zmienia się bardzo nieznacznie wraz ze zmianami prądu bazy i emitery. Można założyć, że wynosi ono ok. 0,6 V.

W takim układzie napięcie na wyjściu podąża za zmianami napięcia na wejściu:

$$U_{wy} = U_{we} - 0,6 \text{ V}$$



STABILIZATOR NAPIĘCIA

- Klasyczny układ, który jest bazą dla liniowych stabilizatorów napięcia.
- Napięcie U_{wy} nie zmienia się przy zmianach prądu emitera Q1.

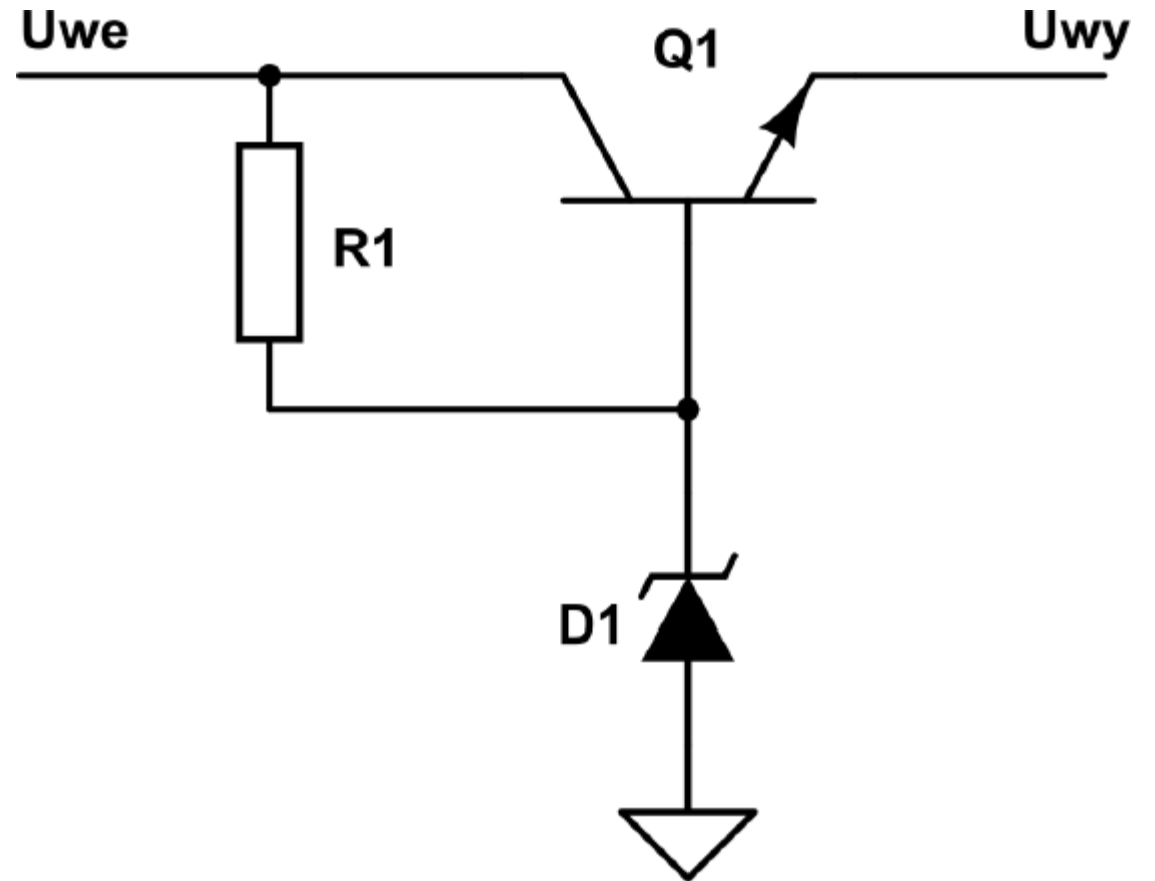
- Zasada działania:

Tranzystor Q1 pracuje podobnie jak wtórnik emiterowy, którego napięciem wejściowym jest napięcie Zenera diody D1.

W związku z tym napięcie na wyjściu utrzymuje stały poziom równy:

$$U_{wy} = U_1 - 0,6 V$$

gdzie U_1 to napięcie Zenera diody.



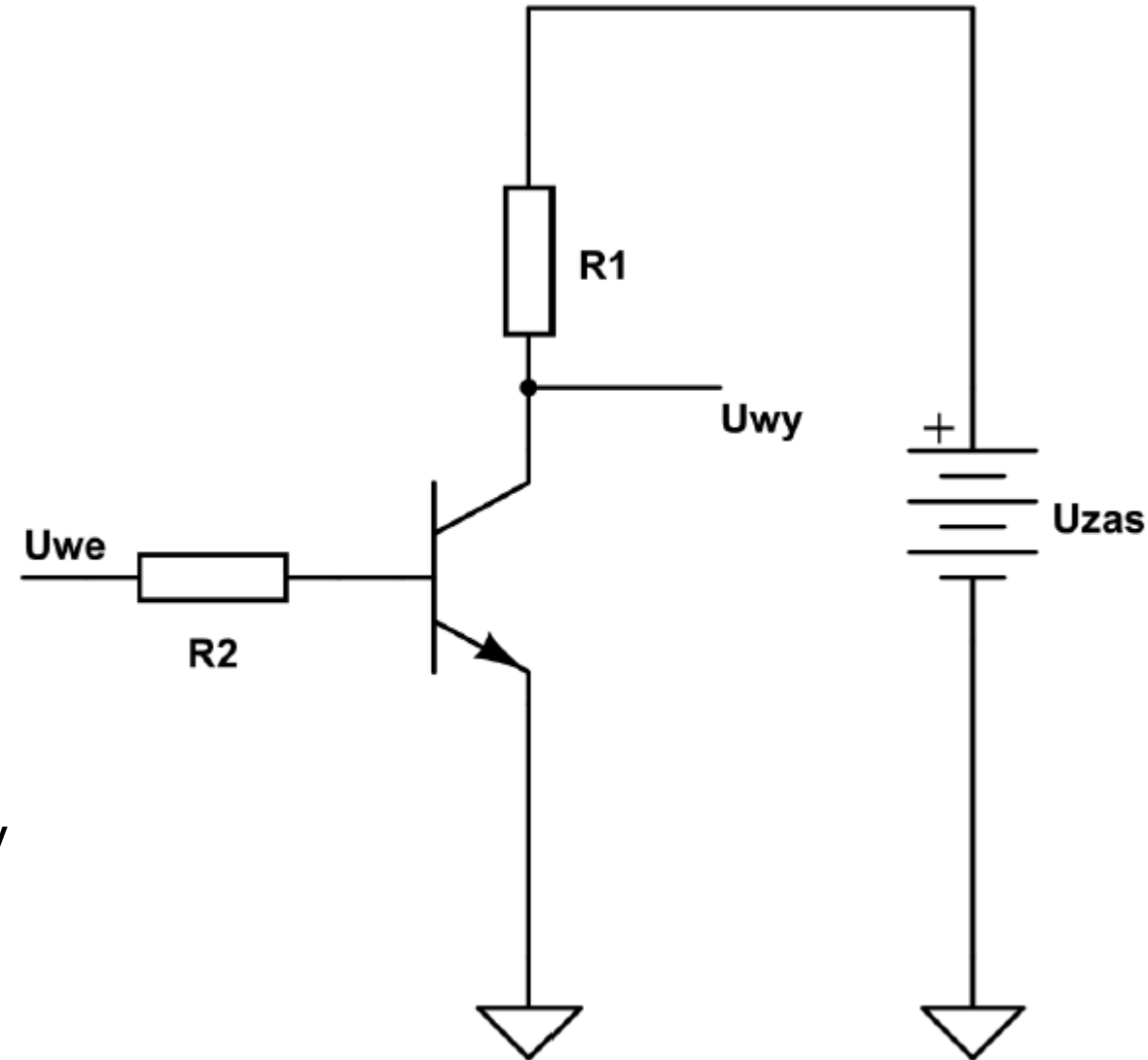
INWERTER

- Przydaje się gdy trzeba zanegować stan logiczny, a nie warto w tym celu dodawać do układu np. kolejnego układu scalonego z bramkami.

- Zasada działania:

Gdy na wejściu znajduje się stan niski ($U_{we} < 0,6 \text{ V}$), tranzystor jest odcięty. W tej sytuacji przez rezystor R_1 nie płynie prąd i napięcie U_{wy} jest równe napięciu zasilania (stan wysoki).

Kiedy na wejściu pojawi się stan wysoki tranzystor zaczyna przewodzić. Otwarty tranzystor zwiera napięcie U_{wy} do masy tworząc stan niski.



UKŁAD DARLINGTONA

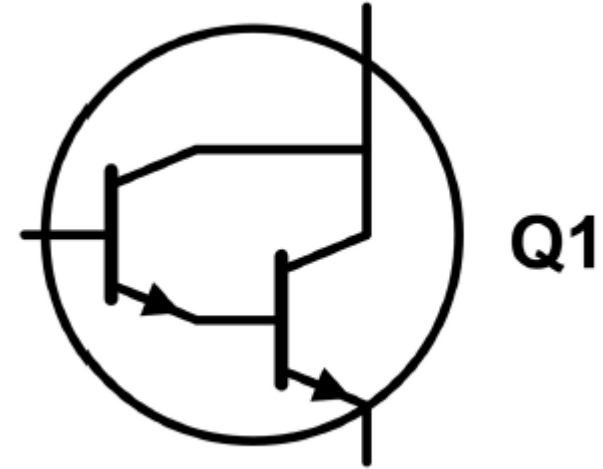
- Kiedy wzmacnienie prądowe pojedynczego tranzystora jest zbyt małe w stosunku do wymagań można połączyć ze sobą dwa tranzystory.

- Zasada działania:

Zasada działania układu jest bardzo prosta.

Lewy tranzystor nie steruje obciążeniem bezpośrednio, ale za pośrednictwem prawego tranzystora.

Dzięki takiemu połączeniu wzmacnienie prądowe całego układu jest równe iloczynowi wzmacnień prądowych obu tranzystorów.



Liniowa praca tranzystora

Do tej pory tranzystor był dla nas przełącznikiem. W pracy kluczującej operujemy na dwóch stanach skrajnych - tranzystor wyłączony/włączony.

Czas zająć się jego pracą liniową.

W tym trybie tranzystor nie ma już tylko włączać i wyłączać prądu, ale ma przetwarzać sygnał analogowy.

To oznacza, że interesuje nas cały obszar pośredni, w którym tranzystor może wzmacniać.

To rozróżnienie jest fundamentalne.

W pracy wzmacniającej celem jest odzwierciedlanie zmiany sygnału wejściowego, lecz w odpowiednio zmienionej skali.

Wzmacniacz w konfiguracji WE

Zmiany napięcia wejściowego U_{we} poprzez kondensator $C1$ są podawane na bazę tranzystora. Ponieważ napięcie baza-emiter tranzystora jest prawie niezmiennie to napięcie emitera tranzystora $Q1$ zmienia się też o wartość U_{we} .

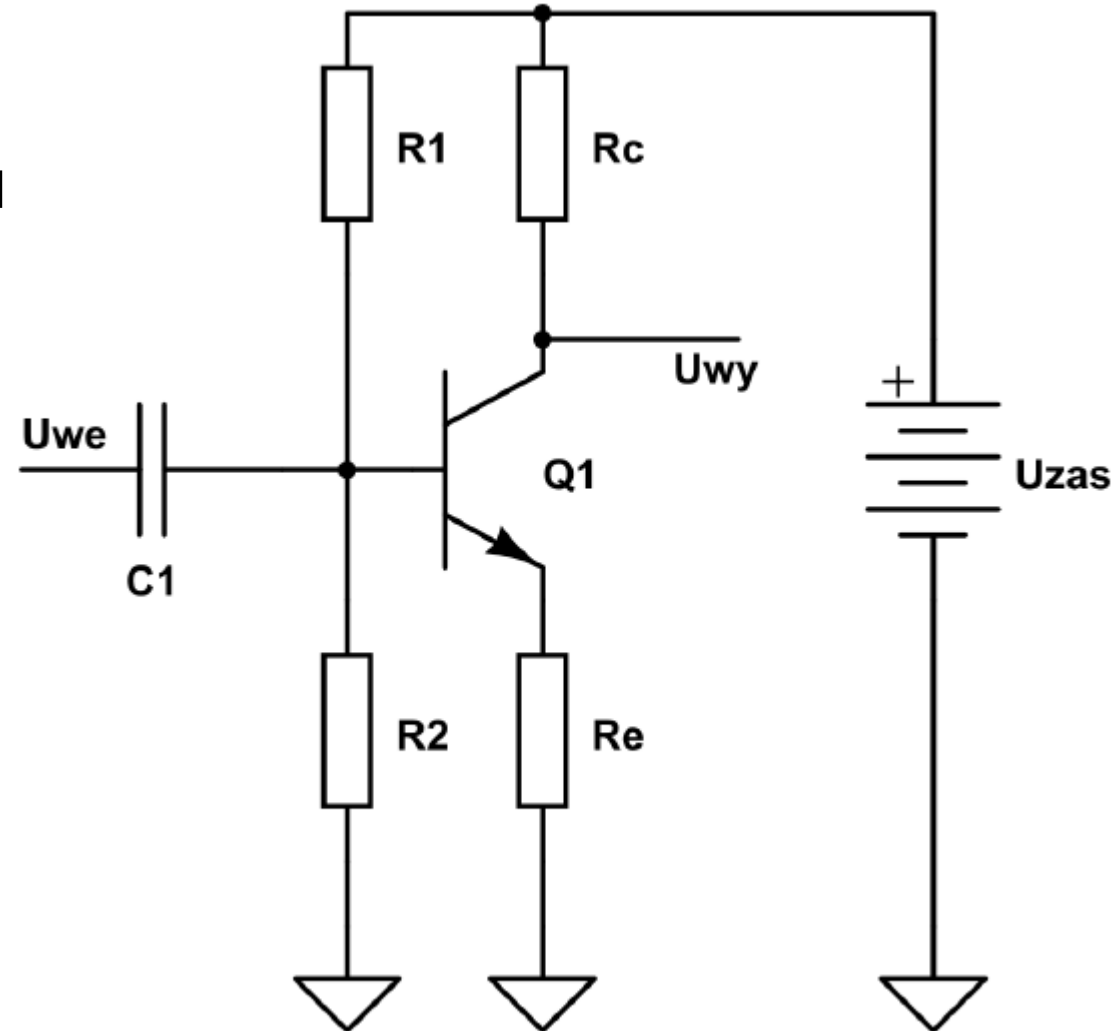
Wytwarza to zmianę prądu kolektora tranzystora o:
 $I_{wy} = U_{we}/R_e$.

Zmiana prądu kolektora powoduje zmianę spadku napięcia na rezystorze R_c o wartość $I_{wy} \times R_c$.

Zmiana napięcia na wyjściu jest wobec tego równa:
 $U_{wy} = -I_{wy} \times R_c$.

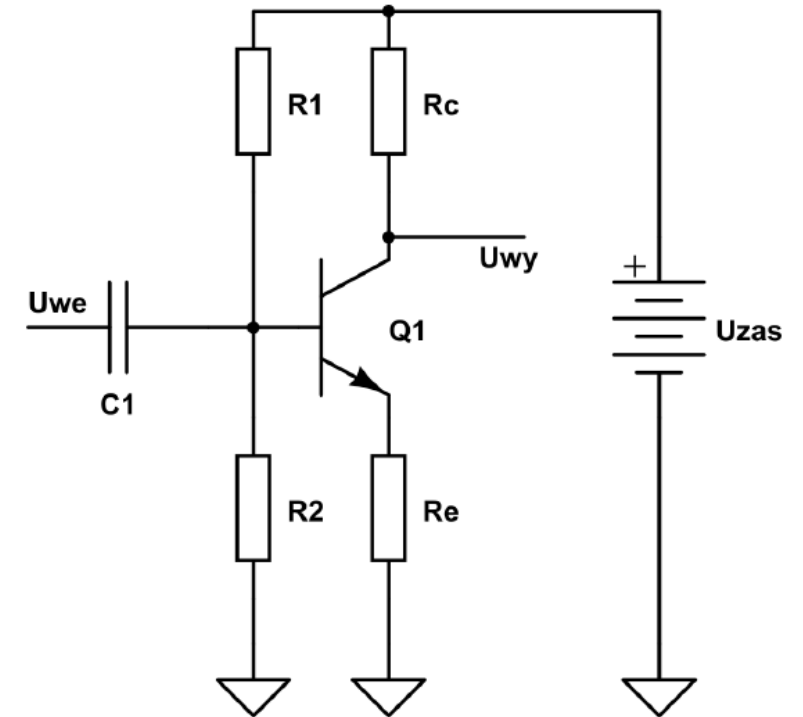
Prowadzi to do wzoru: $U_{wy} = -U_{we} \times R_c/R_e$.

Układ wzmacnia więc zmiany napięcia wejściowego ze wzmocnieniem $-R_c/R_e$.



Na co warto zwrócić uwagę:

- układ wzmacnia składowe zmienne, czyli zmiany napięcia U_{we} względem napięcia stałego,
- układ odwraca fazę, czyli wzrost napięcia U_{we} powoduje spadek napięcia U_{wy} i odwrotnie.

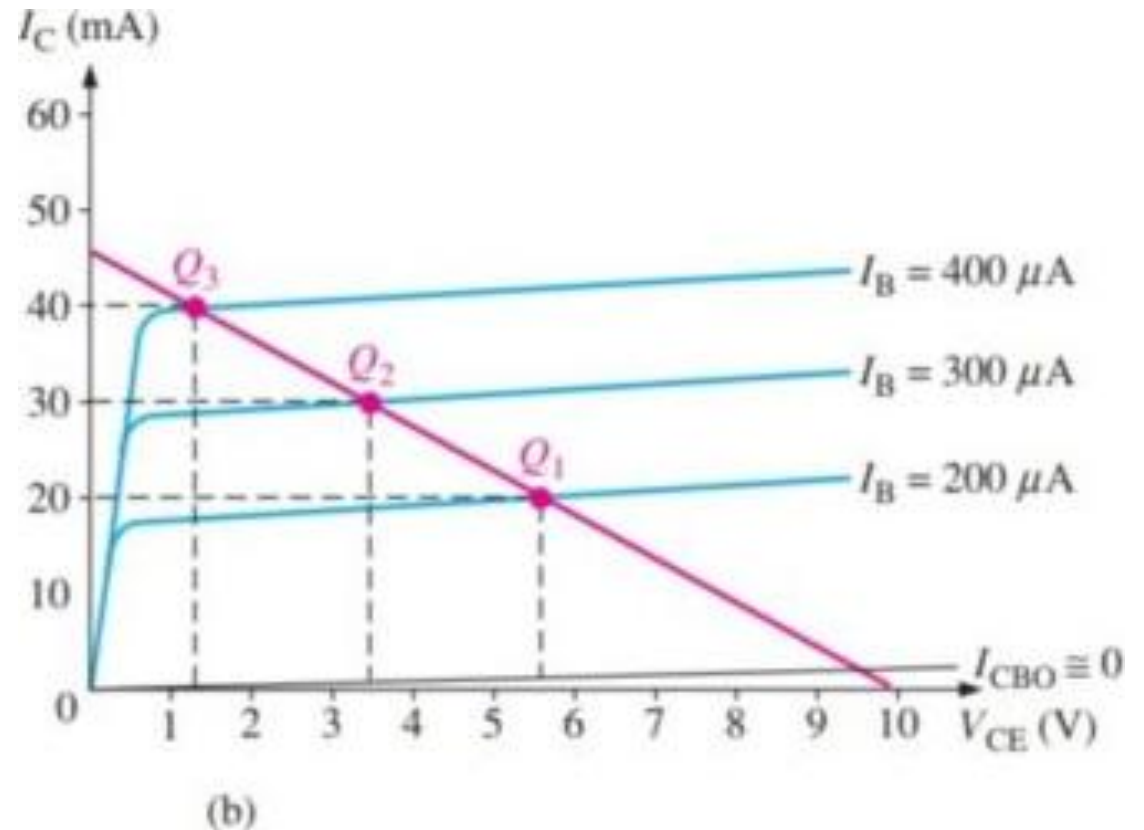


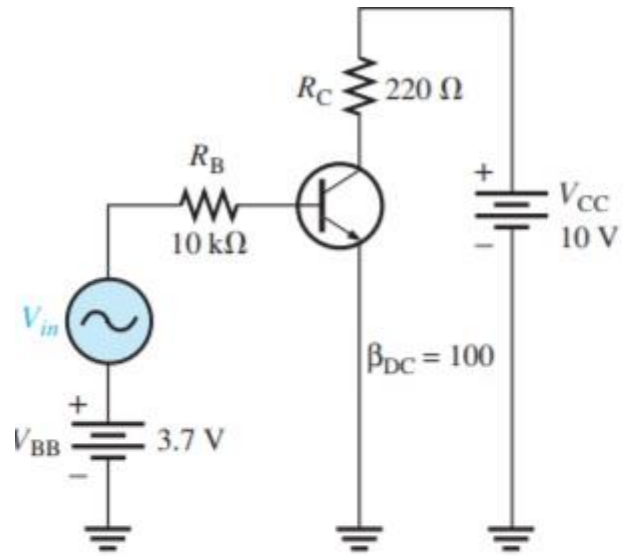
Punkt pracy tranzystora

Trzeba pamiętać, że by tranzystor pracował liniowo, trzeba mu zapewnić odpowiednie warunki spoczynkowe, czyli ustawić tak zwany punkt pracy.

Dopiero wokół tego punktu małe zmiany sygnału mogą być poprawnie wzmacniane.

Bez polaryzacji tranzystor może zbyt łatwo wchodzić w odcięcie albo w nasycenie, a wtedy sygnał zostaje zniekształcony.

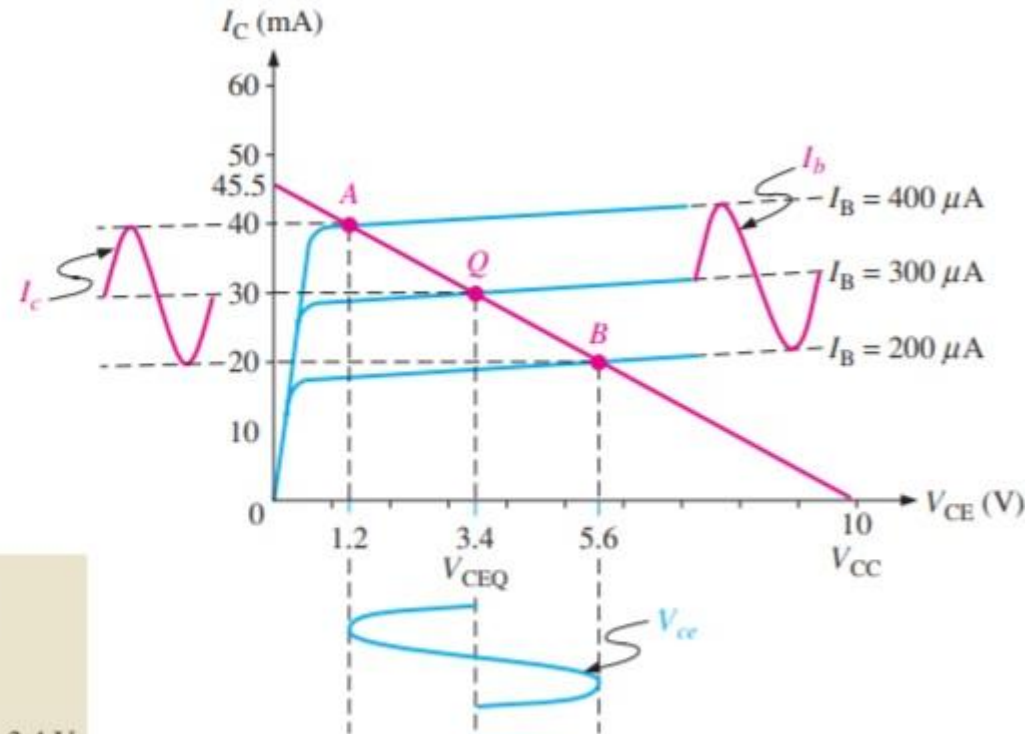




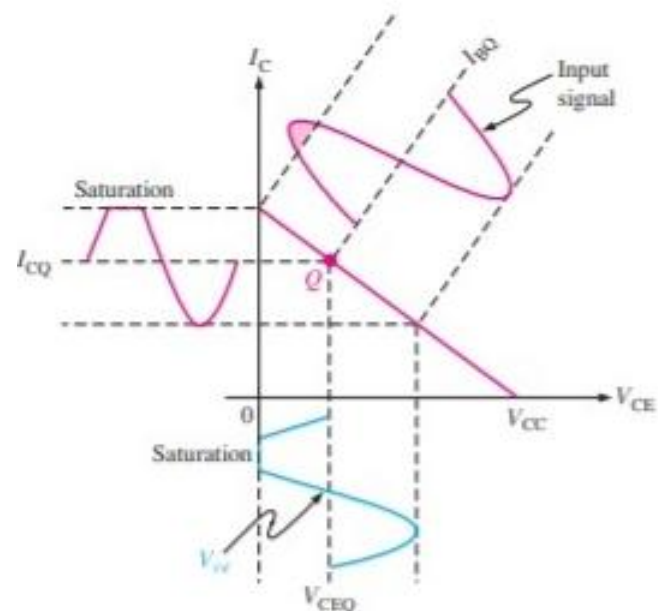
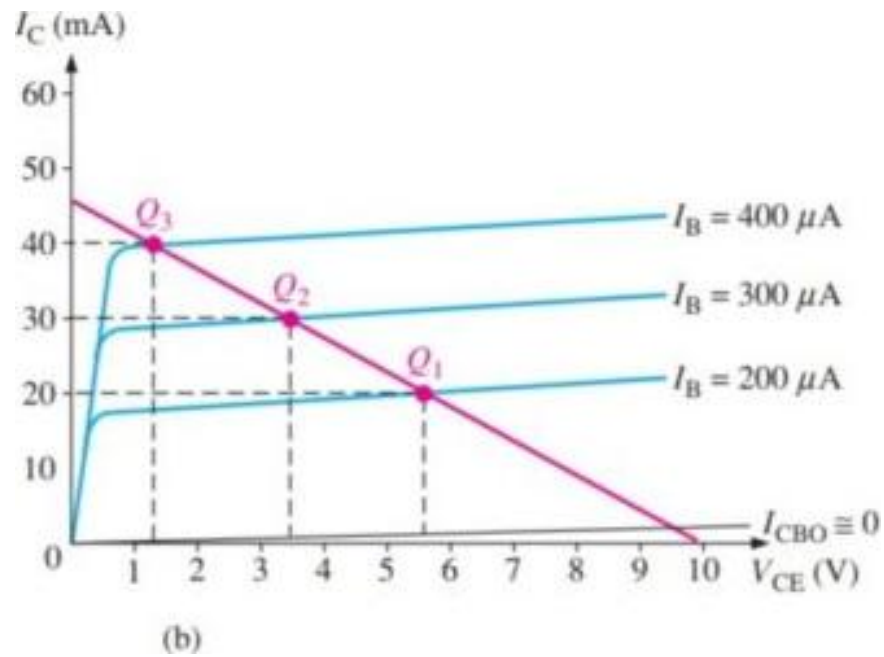
$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - 0.7 \text{ V}}{R_B} = \frac{3.7 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 300 \mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ} = (100)(300 \mu\text{A}) = 30 \text{ mA}$$

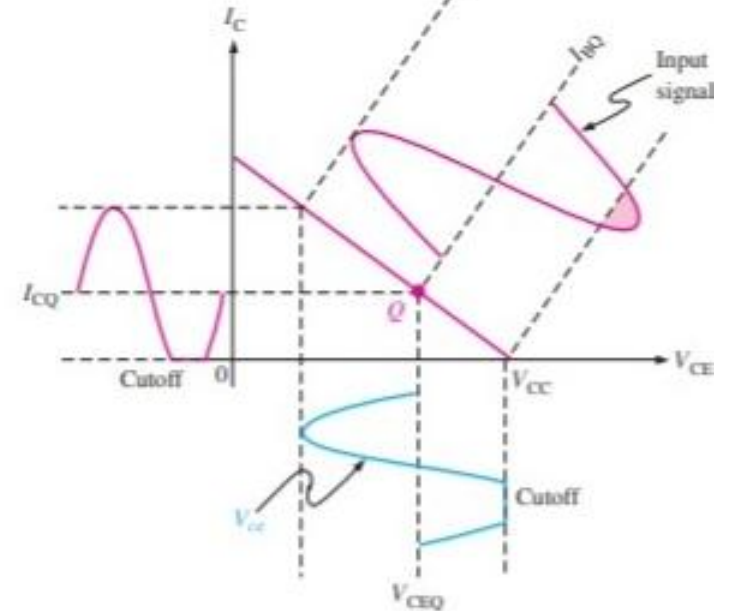
$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 10 \text{ V} - (30 \text{ mA})(220 \Omega) = 3.4 \text{ V}$$



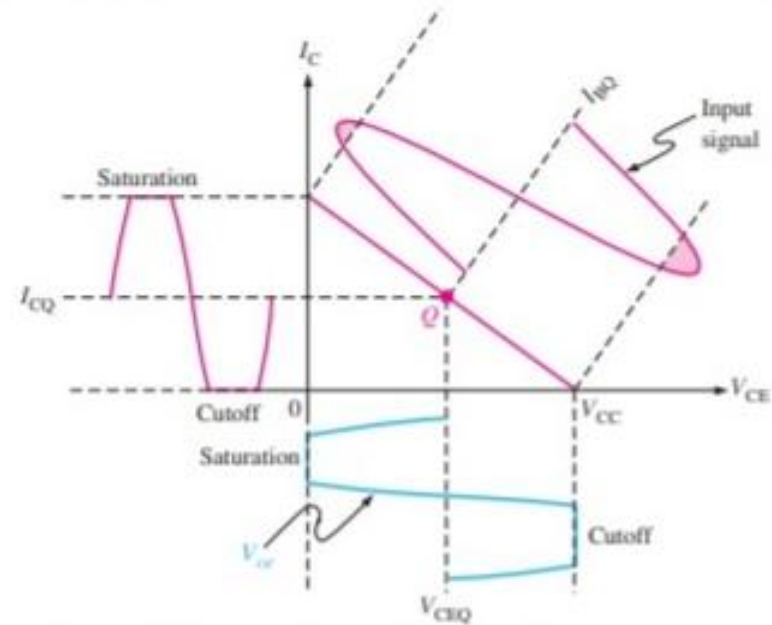
Variations in collector current and collector-to-emitter voltage as a result of a variation in base current



(a) Transistor is driven into saturation because the Q-point is too close to saturation for the given input signal.

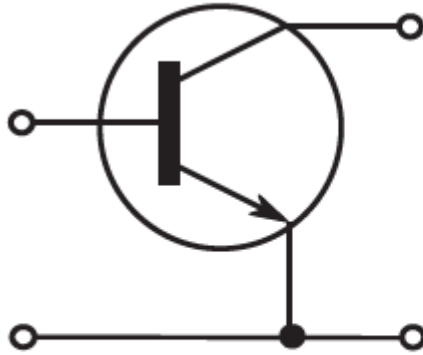


(b) Transistor is driven into cutoff because the Q-point is too close to cutoff for the given input signal.

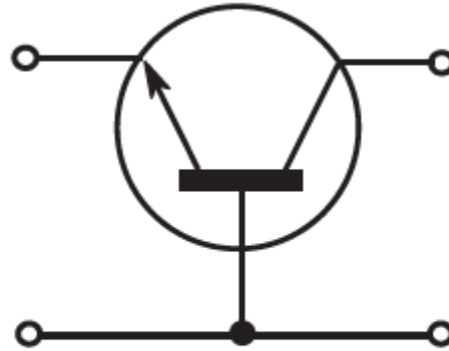


(c) Transistor is driven into both saturation and cutoff because the input signal is too large.

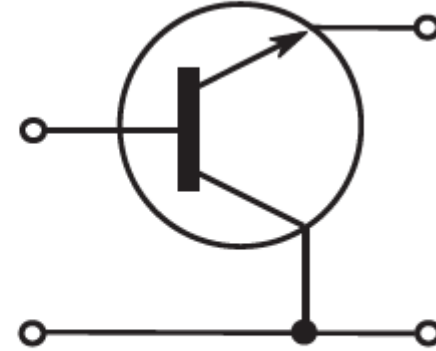
3 podstawowe konfiguracje



WE



WB



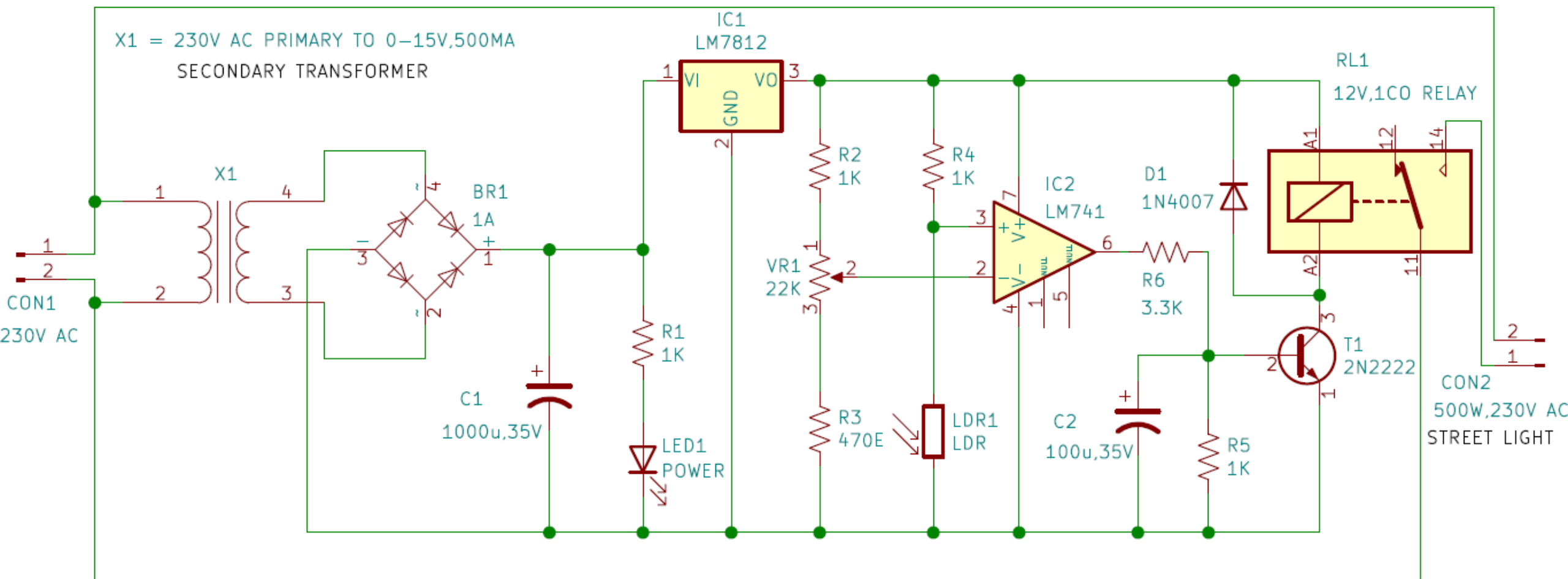
WC

Układ	Wejście	Wyjście	Główna cecha	Typowe zastosowanie
WE	baza	kolektor	wzmacnia napięcie, odwraca fazę	wzmacnianie
WB	emiter	kolektor	małe wzmacnienie prądowe, zastosowania bardziej specjalistyczne	układy wysokoczęstotliwościowe
WC	baza	emiter	wzmocnienie napięciowe bliskie 1, duże wzmacnienie prądowe	bufor, wtórnik emiterowy

3 podstawowe konfiguracje tranzystora bipolarnego

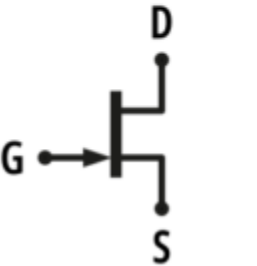
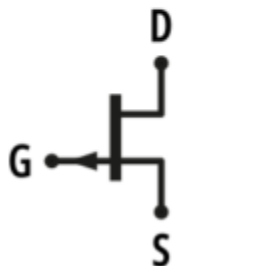
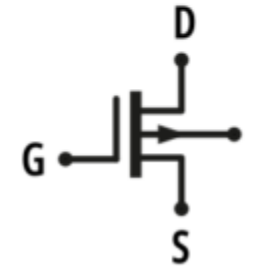
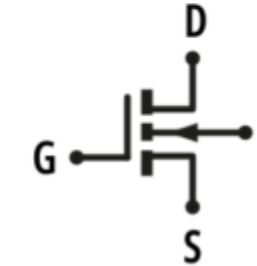
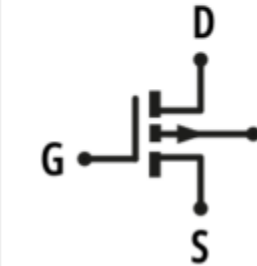
Parametr	Wspólna baza	Wspólny emiter	Wspólny kolektor
Impedancja wejściowa	Niska	Średnia	Wysoka
Impedancja wyjściowa	Wysoka	Wysoka	Niska
Przesunięcie fazowe	0°	180°	0°
Wzmocnienie napięciowe	Wysokie	Wysokie	≈ 1
Wzmocnienie prądowe	≈ 1	Wysokie	Wysokie
Wzmocnienie mocy	Niskie	Bardzo wysokie	Średnie

Układ automatycznego włączania/wyłączania oświetlenia ulicznego



Tranzystory polowe

Istnieje sześć podstawowych rodzajów tranzystorów polowych:

Tranzystory polowe					
złączone		z izolowaną bramką			
		z kanałem zubożanym		z kanałem wzbogaconym	
z kanałem typu n	z kanałem typu p	z kanałem typu n	z kanałem typu p	z kanałem typu n	z kanałem typu p
					

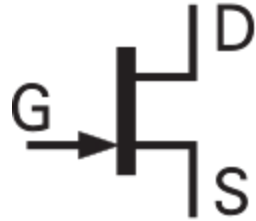
Tranzystory polowe określa się skrótem FET – Field Effect Transistor.

Tranzystor polowy złączowy to JFET (J - Junction).

Tranzystory polowe z izolowaną bramką to MOSFET (MOS -Metal Oxide Semiconductor).

FETy wykorzystywane w praktyce to:

- złączowe z kanałem n (JFET N),
- z izolowaną bramką z kanałem n (MOSFET N),
- z izolowaną bramką z kanałem p (MOSFET P).



JFET N



MOSFET N

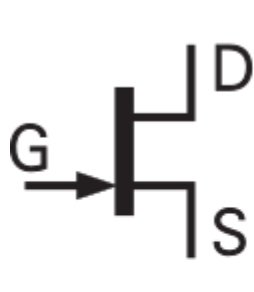


MOSFET P

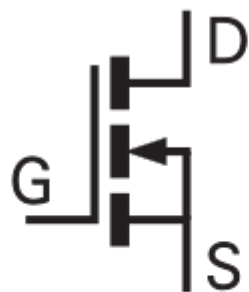
Zauważmy, że symbole MOSFET-ów różnią się od tych pokazanych wcześniej - spotykane na rynku MOSFET-y mają trzy wyprowadzenia, a nie cztery.

Fizyczne podstawy działania tranzystorów polowych są inne niż bipolarnych, niemniej jednak działanie jest podobne:

- tranzystor polowy też ma trzy końcówki.
- elektrodę sterującą, odpowiednik bazy, nazywamy bramką (ang. gate) i oznaczamy dużą literą G.
- w tranzystorze bipolarnym prąd bazy steruje prądem kolektora – im większy prąd bazy, tym większy prąd płynie w obwodzie kolektor–emiter.
- z kolei w tranzystorze polowym prąd sterowany płynie w obwodzie dren – źródło (D – drain, odpowiednik kolektora, S – source, odpowiednik emitera).



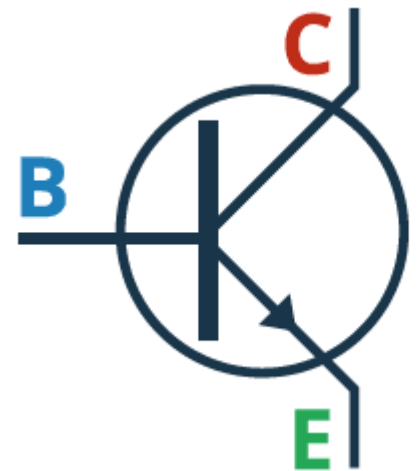
JFET N



MOSFET N



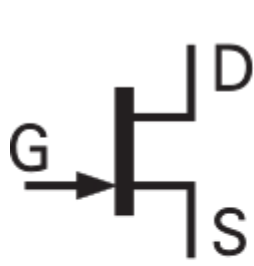
MOSFET P



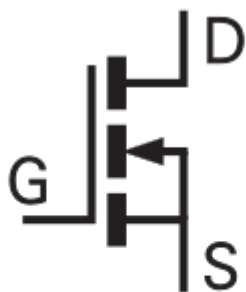
Co najważniejsze, wszystkie tranzystory polowe są sterowane napięciowo.
To znaczy, że w normalnych warunkach w obwodzie bramki nie płynie prąd.

Tranzystor jest otwierany i zamykany pod wpływem napięcia między bramką a źródłem (U_{GS}) – podobnie jak w bipolarnych było dla U_{BE} .

Skoro w obwodzie bramki prąd nie płynie, oznacza to, że rezystancja wejściowa tranzystorów polowych jest bardzo duża, zdecydowanie większa niż bipolarnych.
Jest to jest jedna z kluczowych zalet tranzystorów polowych.



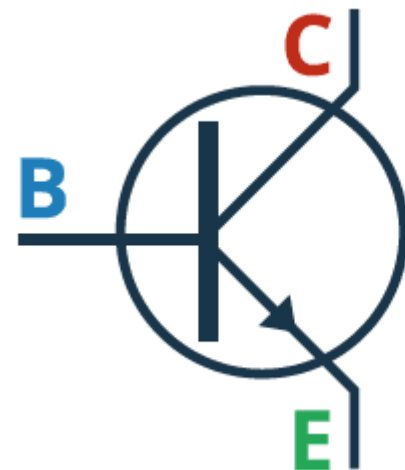
JFET N



MOSFET N



MOSFET P



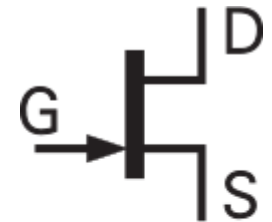
Tranzystory polowe złączowe - JFET

Praktycznie wszystkie spotykane dziś JFETy mają kanał typu n.

Na zasadzie analogii z tranzystorem bipolarnym intuicja podpowiada, że przy zerowym napięciu bramka–źródło (U_{GS}) tranzystor polowy jest zatkany, a otwiera się przy zwiększaniu tego napięcia.

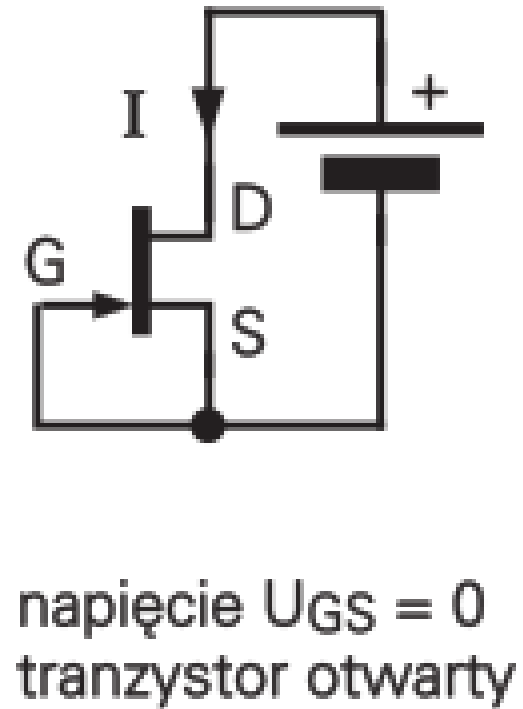
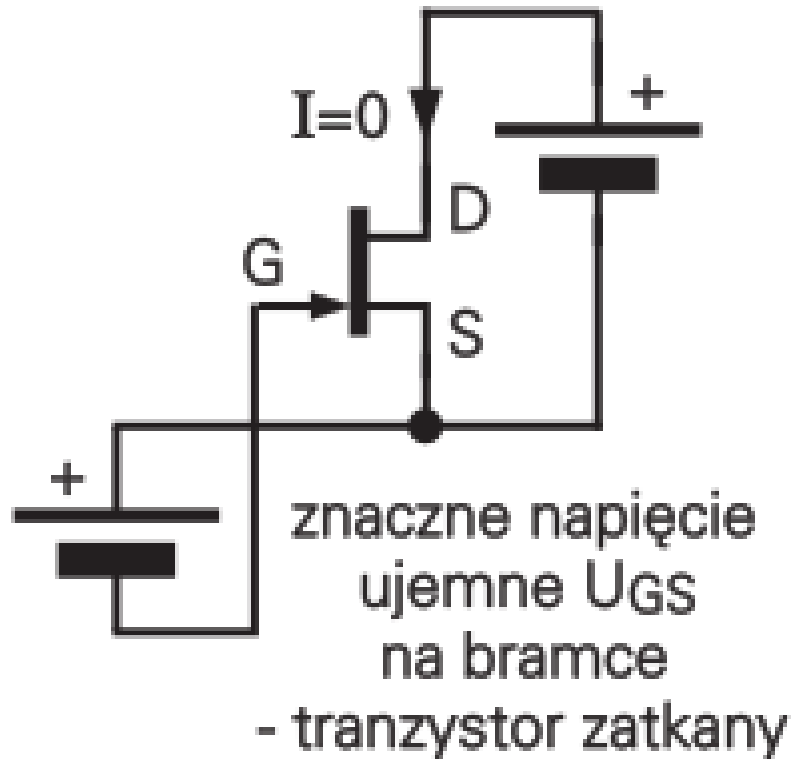
Tak jednak nie jest:

- **tranzystory złączowe przy zerowym napięciu są otwarte,**
- **aby je zatkać, trzeba między źródło a bramkę podać napięcie ujemne.**



JFET N

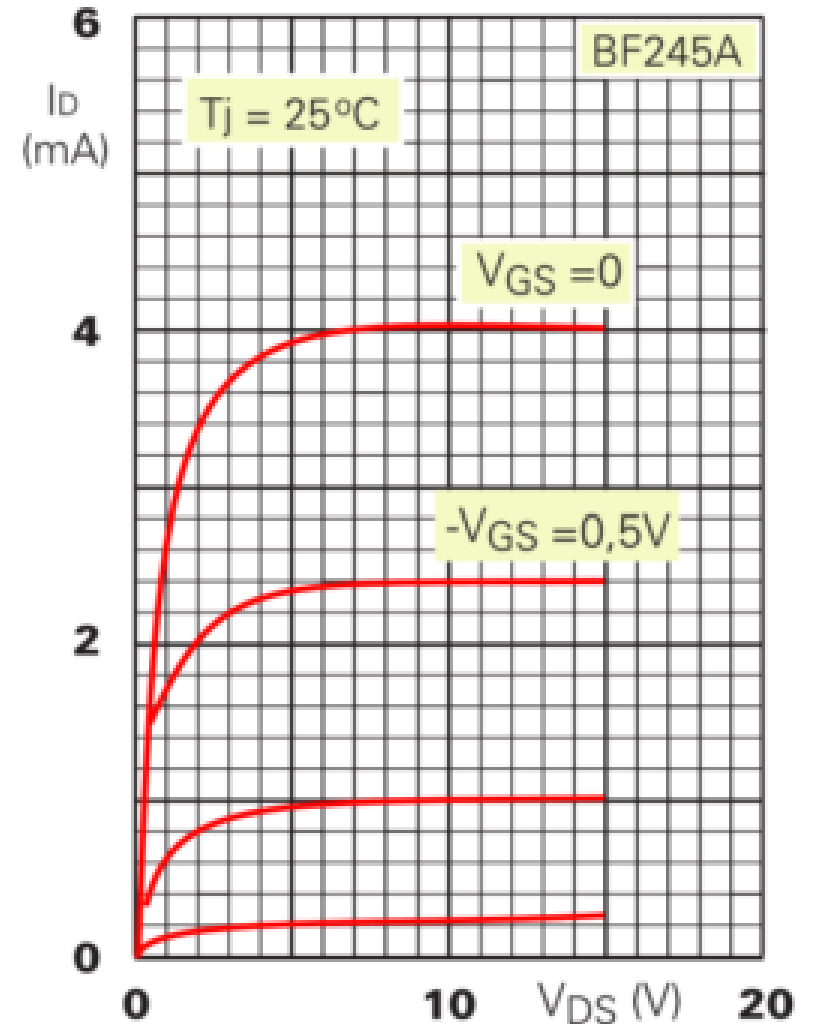
W praktyce działamy tak:



Charakterystyki tranzystorów JFET

Zwróćmy uwagę, że przy napięciach dren-źródło większych od 5 V prąd drenu praktycznie nie zależy od napięcia drenu – charakterystyka na rysunku przebiega poziomo.

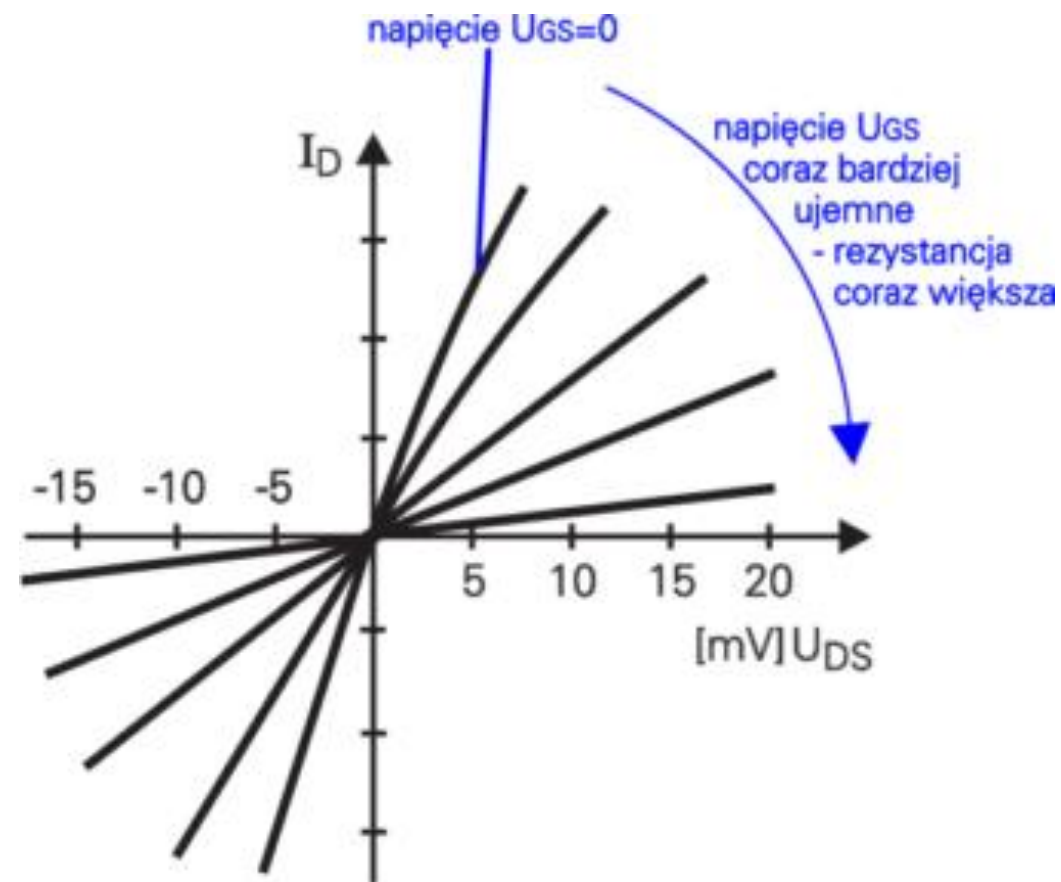
Jeśli przy zmianach napięcia prąd się zmienia bardzo mało, to znaczy, że obwód drenu ma w tym fragmencie właściwości źródła prądowego.



Natomiast w zakresie bardzo małych napięć dren-źródło, rzędu ± 20 mV (czyli także dla małych napięć zmiennych), nachylenie zależy od napięcia U_{GS} .

A to nachylenie to nic innego jak rezystancja.

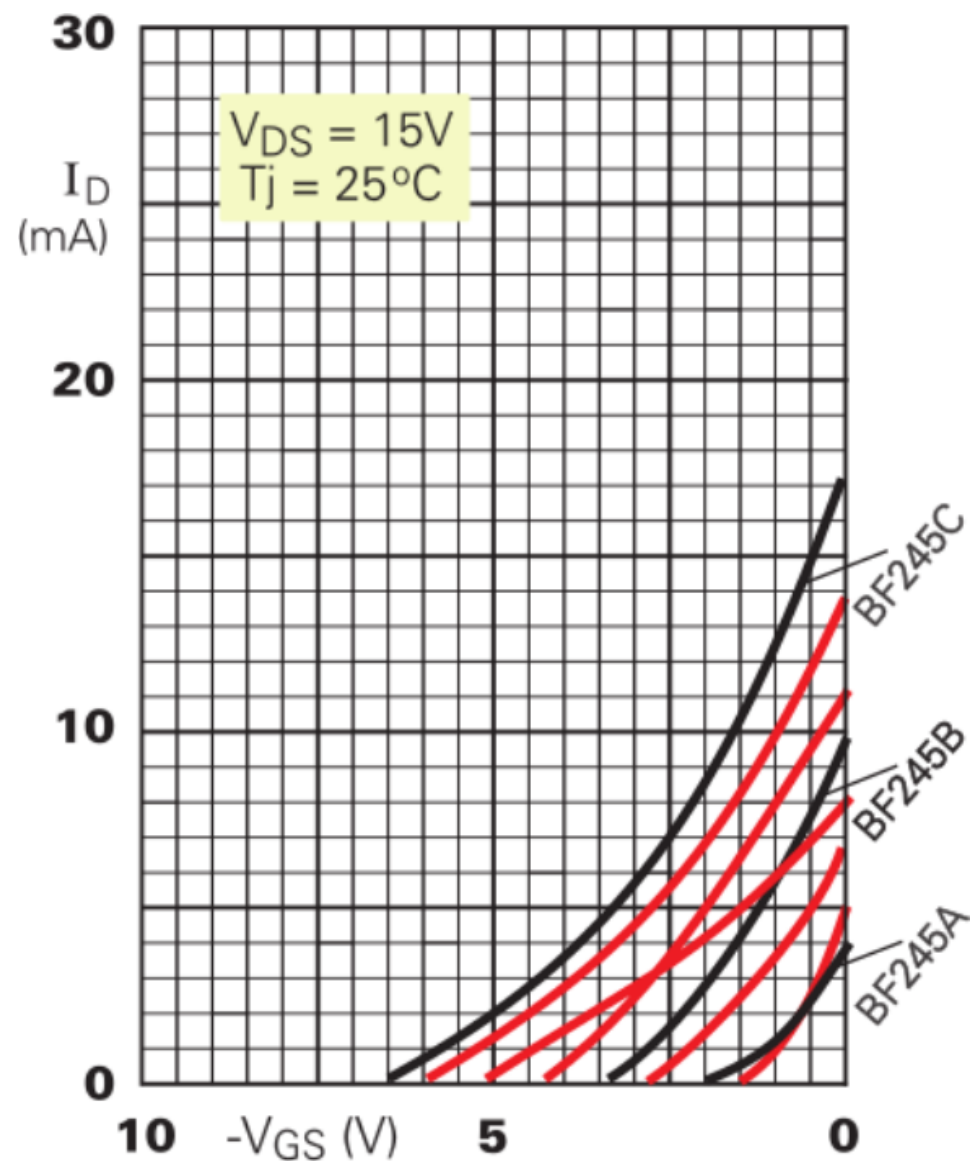
To znaczy, że dla małych sygnałów zmiennych obwód dren-źródło jest opornikiem o rezystancji zależnej od napięcia U_{GS} .



Polowe tranzystory złączowe bywają zatem używane w obwodach, gdzie trzeba napięciowo regulować poziom niewielkich sygnałów zmiennych

Ważniejsza jest kolejna charakterystyka:

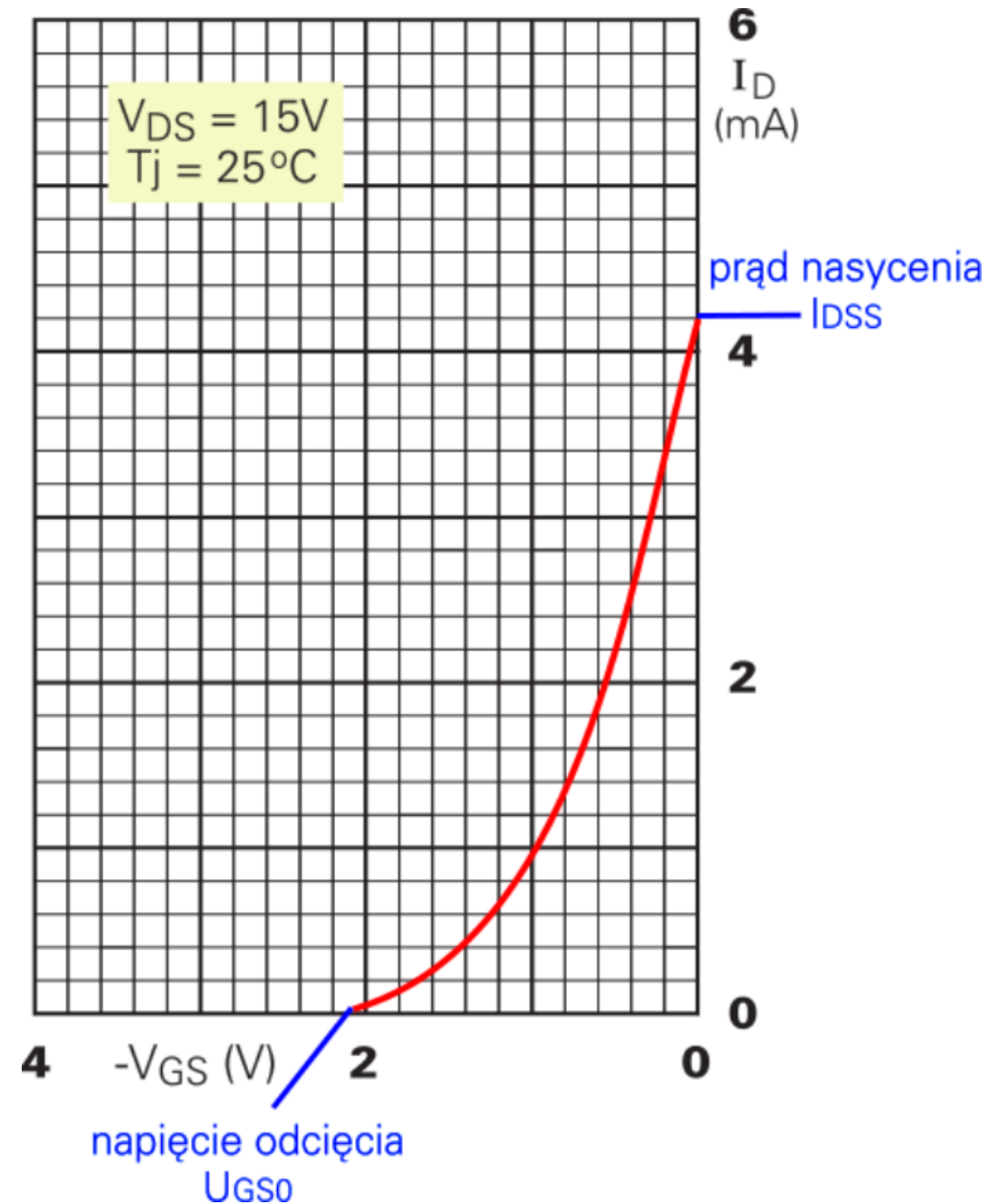
- w przypadku tranzystorów bipolarnych poszczególne egzemplarze różnią się przede wszystkim wartością wzmocnienia prądowego, natomiast napięcie baza-emiter, potrzebne do otwarcia tranzystora we wszystkich tranzystorach, jest praktycznie takie samo;
- inaczej jest w przypadku tranzystorów polowych. Tu napięcie U_{GS0} , przy którym tranzystor zaczyna się otwierać, różni się dla poszczególnych modeli i egzemplarzy;
- poszczególne egzemplarze różnią się też prądem drenu I_{DSS} (przy zerowym napięciu U_{GS}), jak też nachyleniem charakterystyki.



Jednym z podstawowych parametrów tranzystora polowego złączowego jest właśnie napięcie bramka-źródło, przy którym zaczyna się on otwierać.

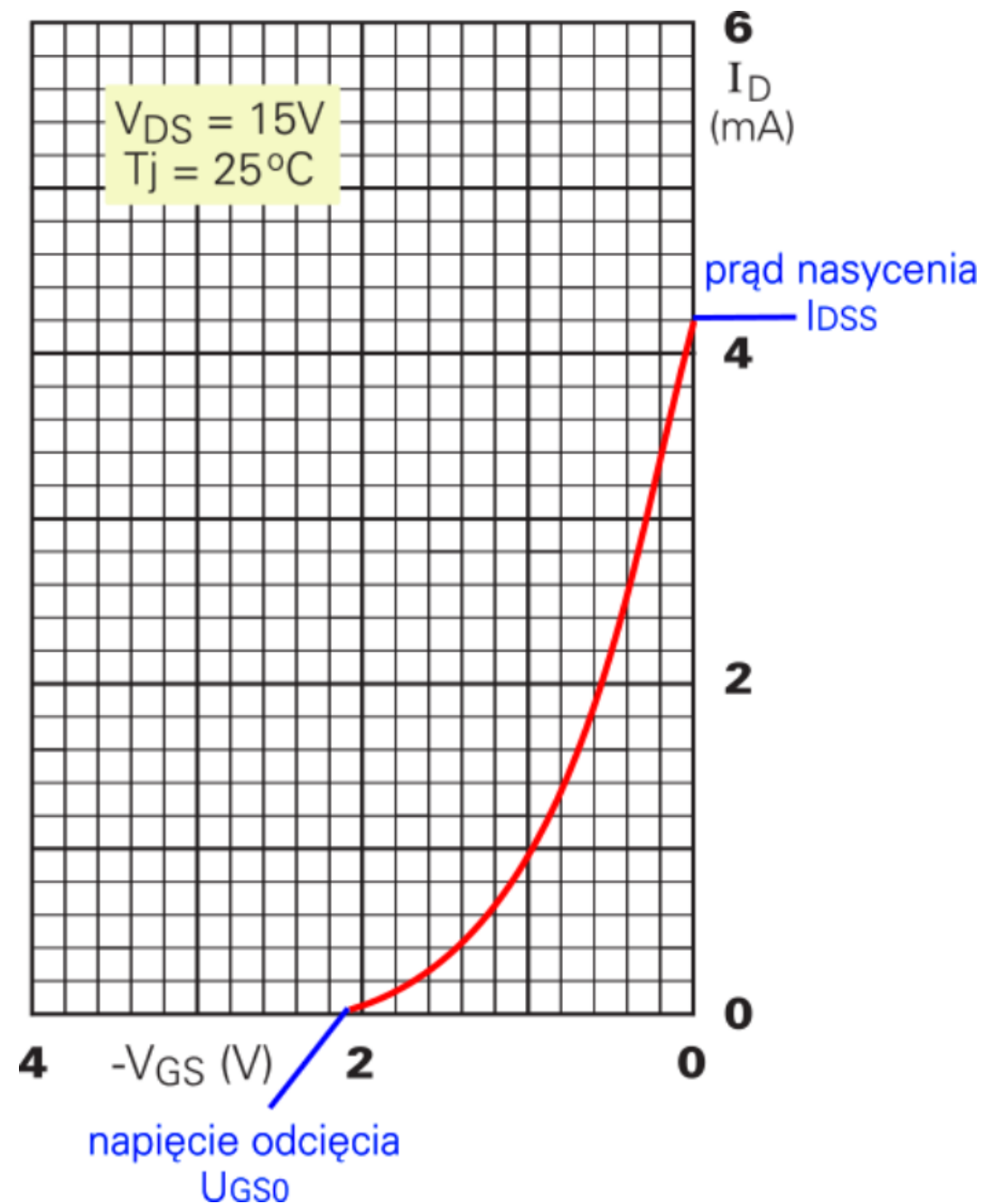
To napięcie progu otwierania (napięcie odcięcia) oznaczane jest w katalogach U_{GS0} i dla spotykanych na rynku tranzystorów JFET wynosi: $-10\text{ V} \dots -0,5\text{ V}$.

Drugim istotnym parametrem tranzystorów złączowych jest prąd nasycenia drenu przy zerowym napięciu U_{GS} , czyli przy maksymalnym otwarciu tranzystora, oznaczany I_{DSS} .



Zauważmy, że nachylenie charakterystyki określa przyrost prądu drenu pod wpływem przyrostu napięcia sterującego U_{GS} .

Jest to tak zwana **transkonduktancja**, wyrażana w miliamperach na wolt (mA/V) lub w amperach na wolt (A/V), czyli w milisimensach (mS) lub simensach (S).

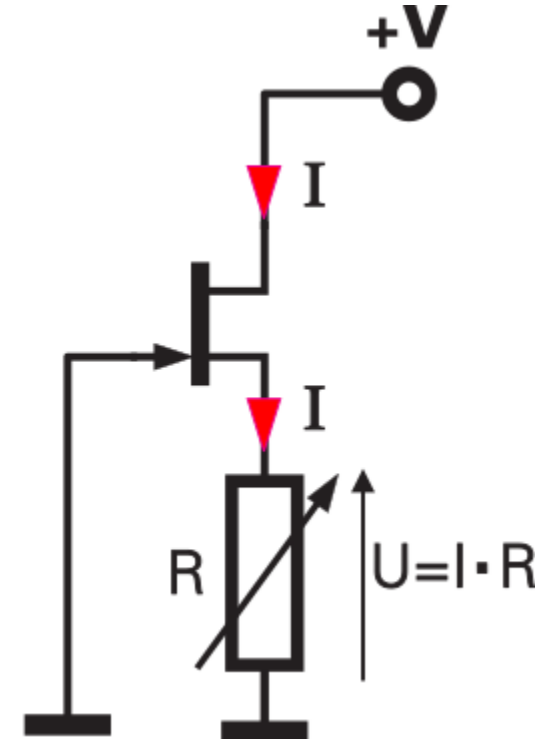
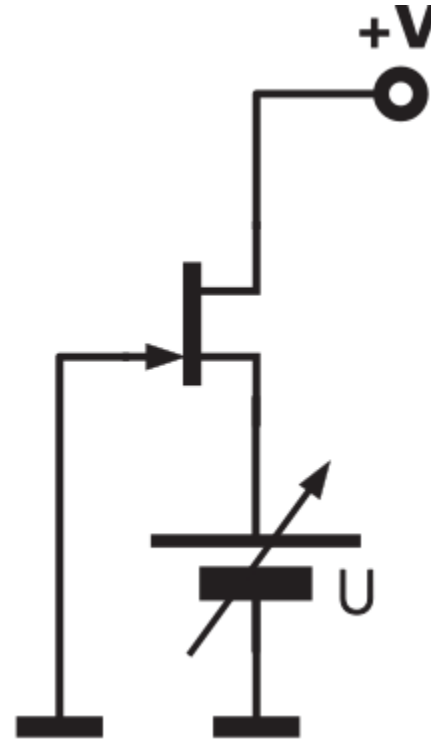


Jak wskazuje charakterystyka, w trakcie normalnej pracy napięcie bramka–źródło powinno być ujemne lub co najwyżej równe zero.

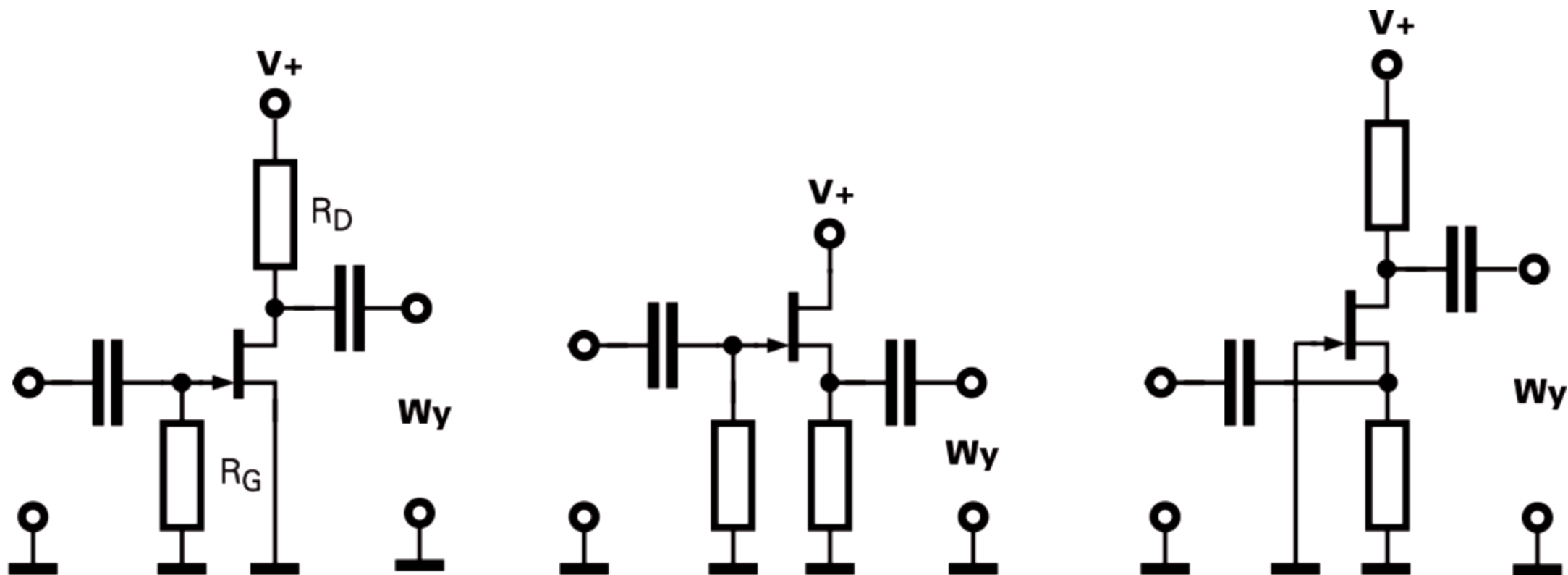
Może to się wydać dużym utrudnieniem, bo np. skąd wziąć w układzie cyfrowym ujemne napięcie.

Żeby pominąć to ograniczenie, zamiast obniżać napięcie bramki, można podwyższyć napięcie źródła.

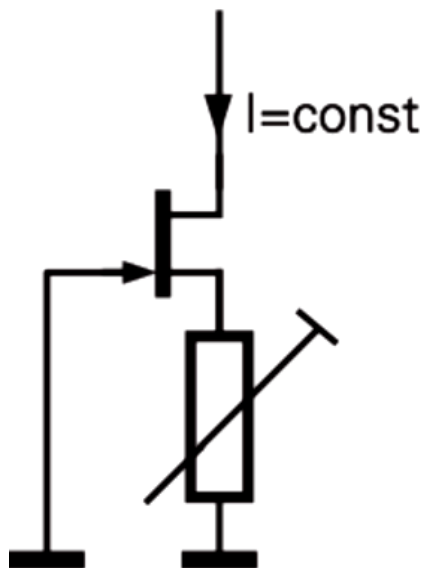
Nie trzeba też stosować dodatkowego źródła – można wykorzystać spadek napięcia na rezystorze.



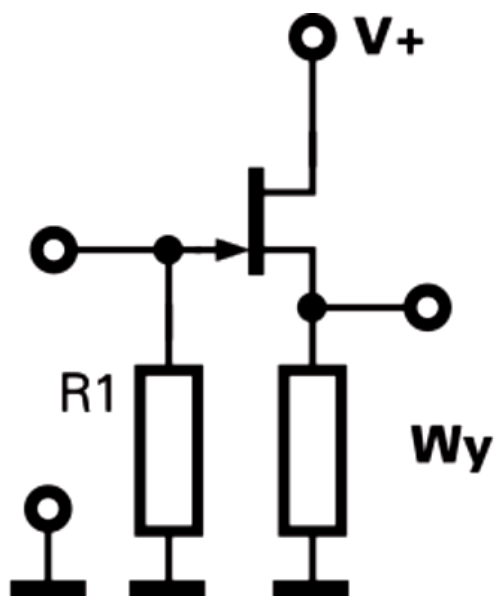
Tranzystory polowe także mogą pracować w układach ze wspólnym źródłem, wspólnym drenem i wspólną bramką, analogicznie jak tranzystory bipolarne pracują w układach ze wspólnym emiterem, wspólnym kolektorem i wspólną bazą.



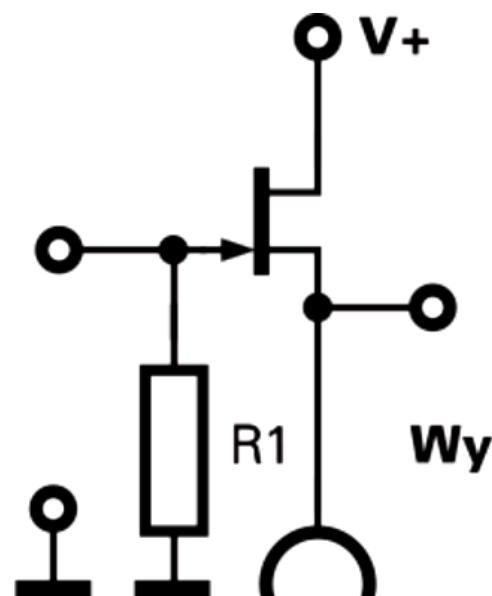
W praktyce najczęściej bywają wykorzystywane proste układy z rysunku poniżej - źródło prądowe oraz wtórnik mające bardzo dużą rezystancję wejściową. Omówimy je po kolei...



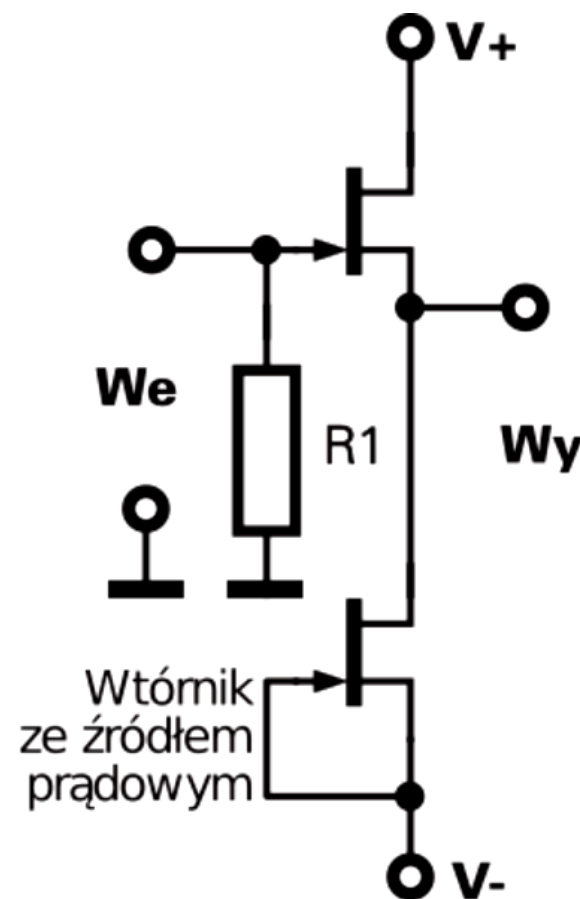
źródło
prądowe



wtórnik
prosty



wtórnik
ze źródłem
prądowym



Wtórnik
ze źródłem
prądowym

Zasada działania:

W tranzystorze JFET prąd drenu zależy od napięcia bramka–źródło U_{GS} .

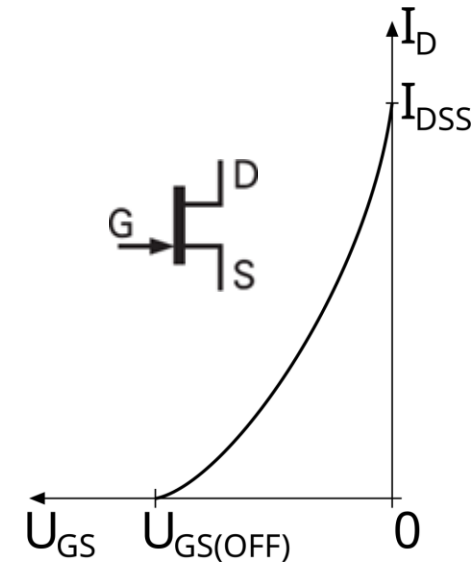
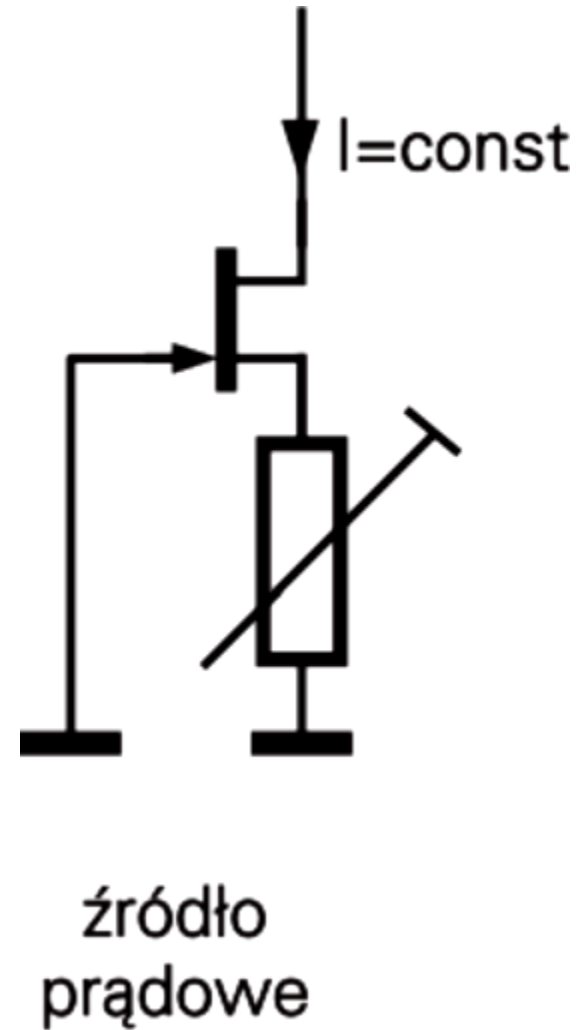
Jeśli bramka jest na stałym potencjale, a w źródle mamy rezystor, to tranzystor sam ustala taki prąd, aby spełnić zależność:

$$U_{GS} = U_G - U_S$$

Ponieważ:

- bramka ma potencjał 0 V,
 - źródło ma napięcie $U_S = I \cdot R_S$,
- to wzrost prądu powoduje wzrost napięcia źródła, a to zmniejsza U_{GS} .

Czyli działa ujemne sprzężenie zwrotne.



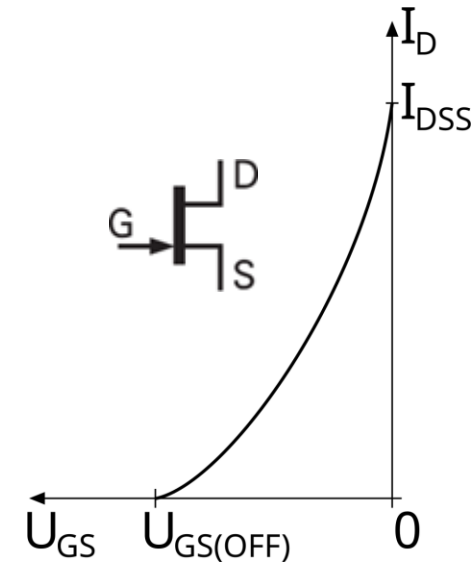
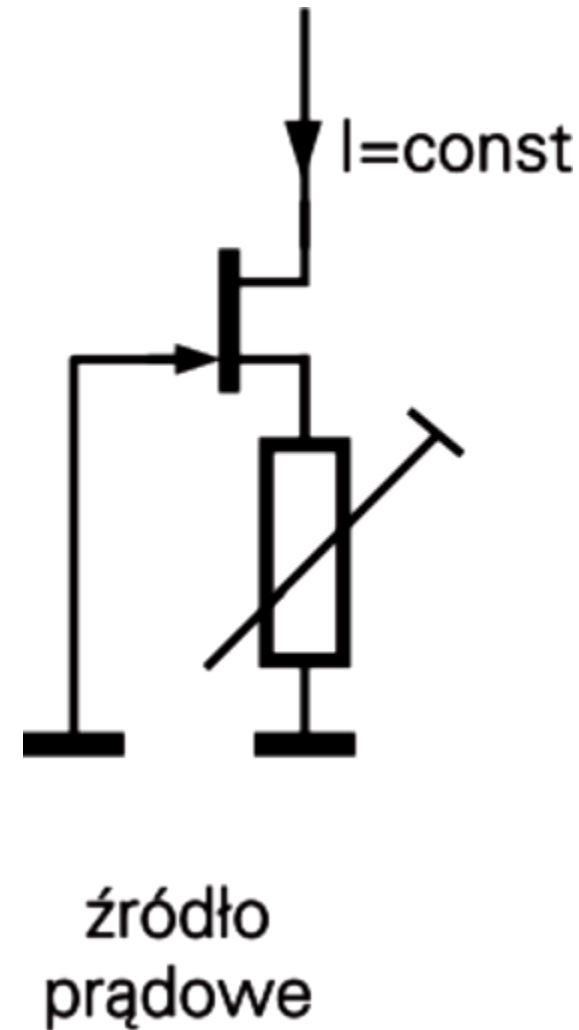
Co z tego wynika?

Jeśli prąd próbowałby wzrosnąć:

- rośnie spadek napięcia na rezystorze źródła,
- rośnie napięcie źródła,
- maleje U_{GS} ,
- tranzystor się „przemyka”,
- prąd się zmniejsza.

Jeśli prąd próbowałby zmaleć, dzieje się odwrotnie.

Dlatego dostajemy w przybliżeniu stały prąd.



Zasada działania:

Źródło „podąża” za napięciem bramki.

Jeśli napięcie bramki rośnie, tranzystor zaczyna mocniej przewodzić, więc:

- rośnie prąd,
- rośnie spadek napięcia na rezystorze źródła,
- rośnie napięcie wyjściowe na źródle.

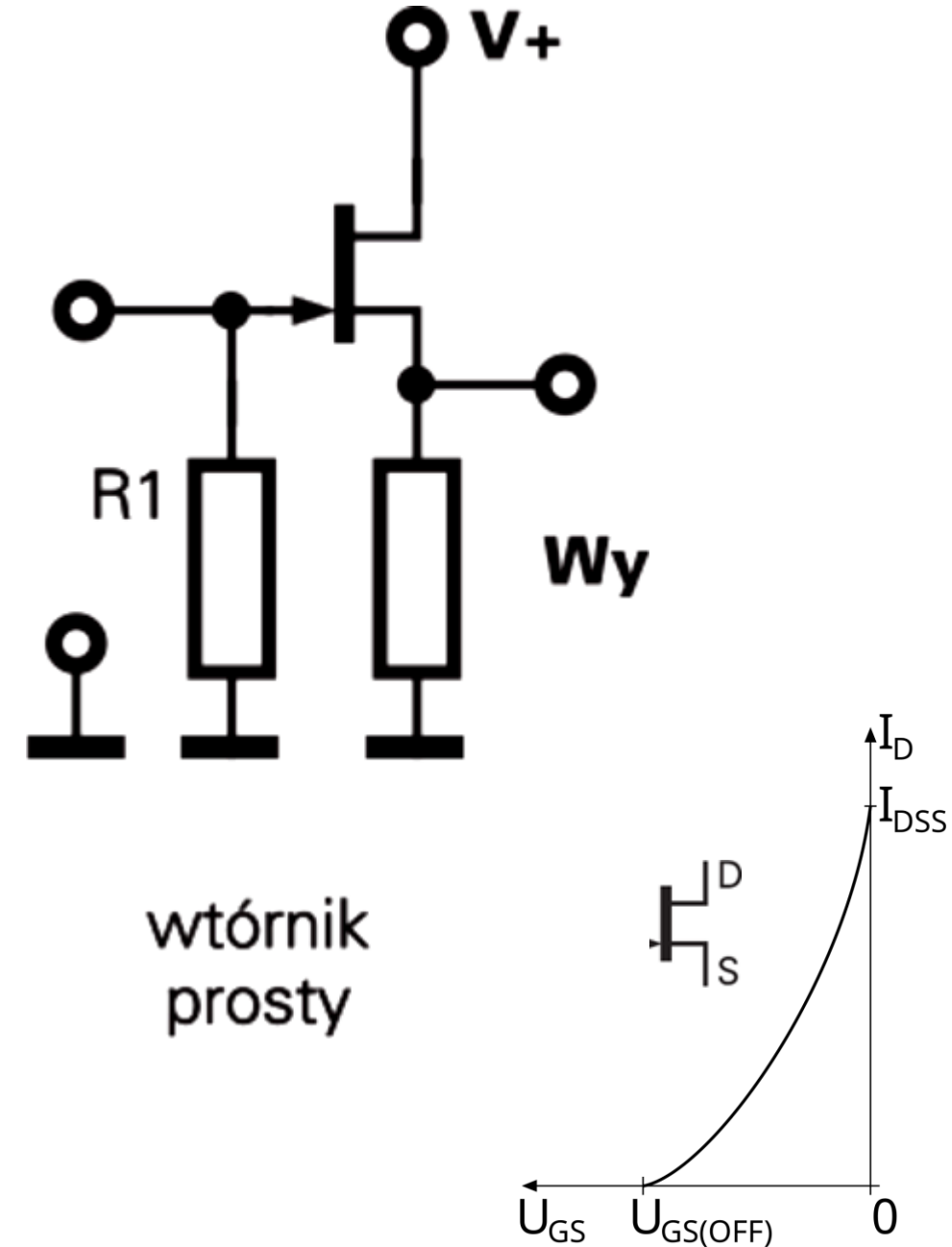
W efekcie:

$$U_{wy} \approx U_{we} - U_{GS}$$

czyli napięcie wyjścia jest nieco niższe od wejścia.

R1 ustala punkt pracy:

- bez niego źródło nie miałooby ustalonego prądu spoczynkowego,
- dzięki niemu układ ma stabilne warunki pracy.



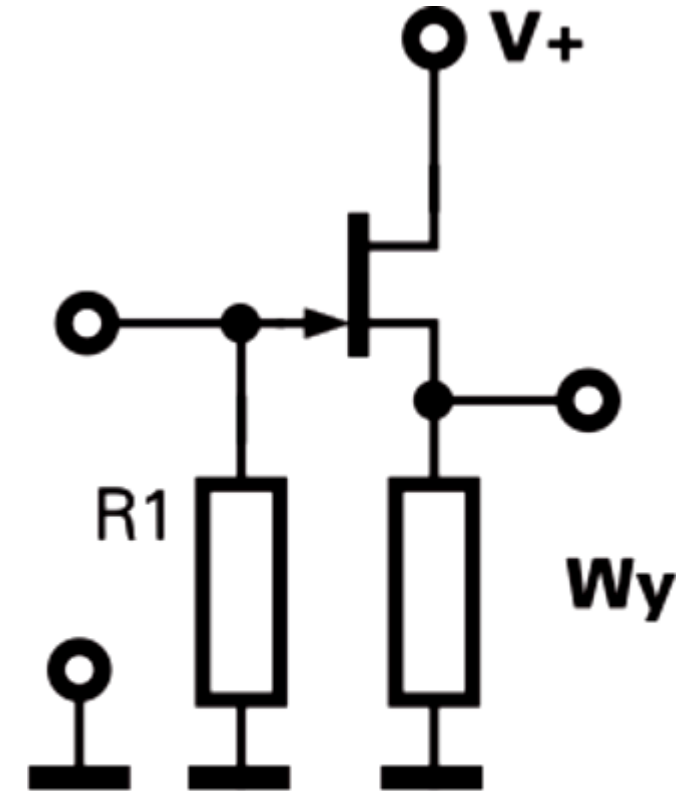
Najważniejsze cechy:

- bardzo duża rezystancja wejściowa,
- mała rezystancja wyjściowa,
- wzmacnienie napięciowe nieco mniejsze od 1,
- brak odwrócenia fazy.

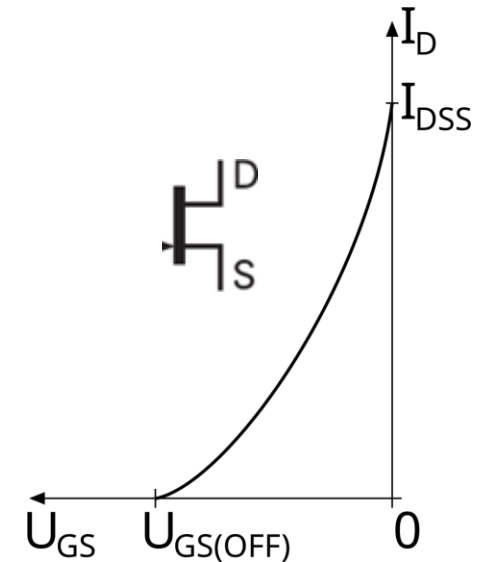
Co fizycznie robi wtórnik?

- na wejściu prawie nie pobiera prądu,
- na wyjściu potrafi dostarczyć większy prąd do obciążenia,

więc jest dobrym separatorem impedancyjnym - źródło sygnału nie jest obciążane, a obciążenie dostaje sygnał z niskiej impedancji.



wtórnik
prosty



W praktyce zamiast rezystora w źródle lepsze jest źródło prądowe.

Rezystor w źródle ma wadę - prąd zależy od napięcia wyjściowego.

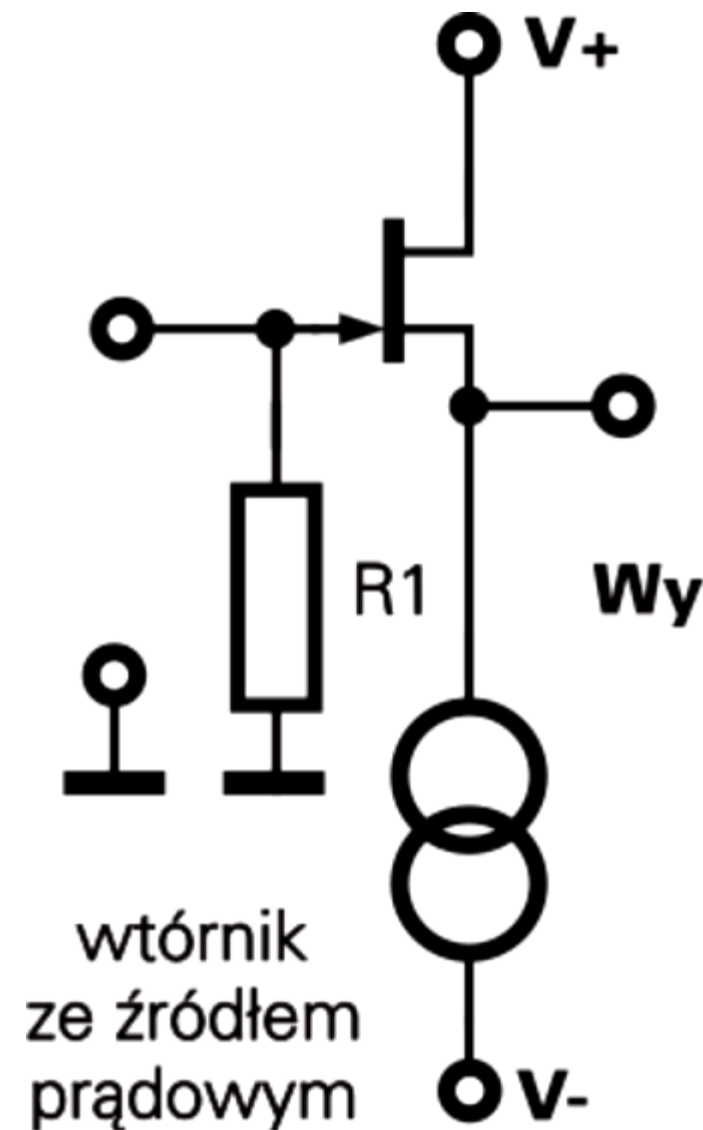
Z kolei źródło prądowe sprawia, że prąd jest bardziej stały.

Dzięki temu wtórnik działa lepiej.

Innymi słowy...

W zwykłym wtórniku rezystor „przeszkadza”, bo zmiany napięcia wyjściowego zmieniają prąd.

W źródle prądowym prąd jest prawie stały, więc tranzystor pracuje w bardziej kontrolowanych warunkach.

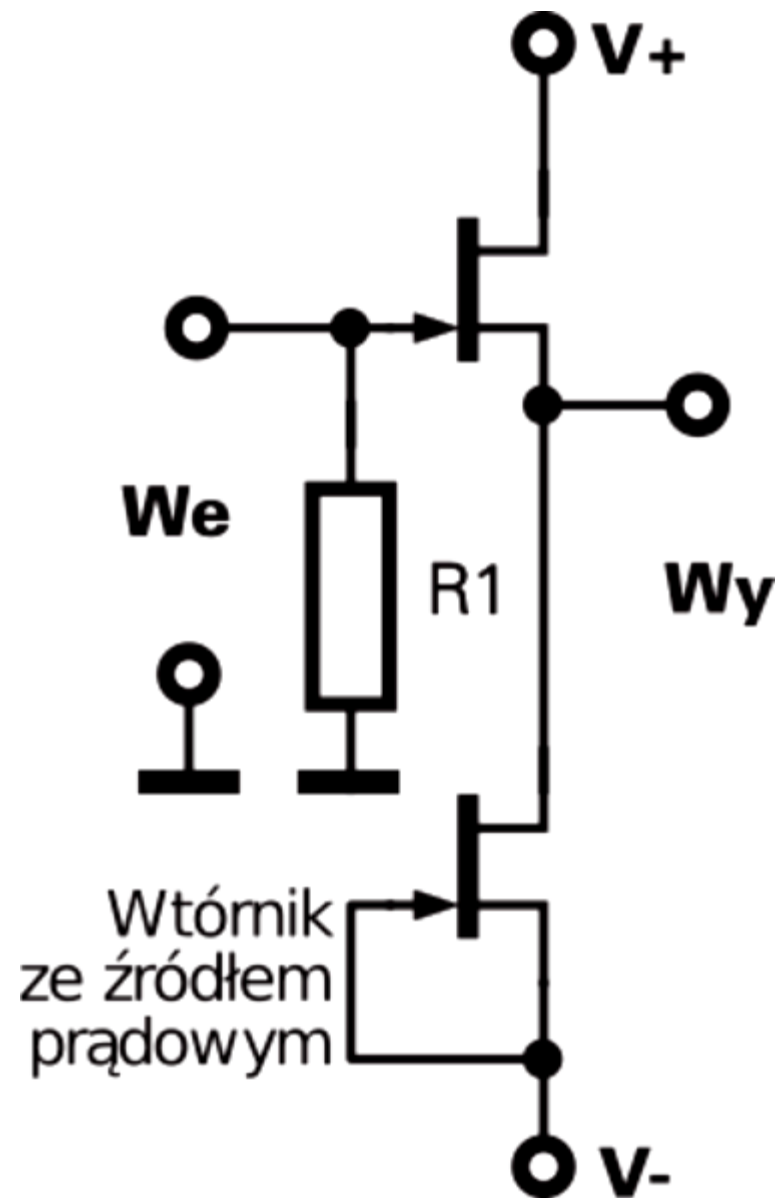


Szczególnie dobre właściwości (szerokie pasmo, jednakowe napięcie stałe na wejściu i wyjściu, stabilność cieplna) ma wtórnik z rysunku obok.

Warunkiem jest zastosowanie dwóch identycznych tranzystorów.

Takie elementy, zawierające w jednej obudowie dwa bliźniacze tranzystory FET są dostępne.

Prawie każdy oscyloskop ma na wejściu taki wtórnik.



Zastosowania tranzystorów JFET

JFET-y stosuje się dziś głównie tam, gdzie liczy się bardzo duża rezystancja wejściowa, mały prąd wejściowy, niski szum wejściowy przy źródłach o dużej impedancji.

Kluczowe zalety:

Bardzo duża rezystancja wejściowa

Bramka JFET-a jest spolaryzowana zaporowo, więc prąd bramki jest bardzo mały.

To oznacza, że:

- źródło sygnału nie jest obciążane,
- nie „psujemy” mierzonego sygnału,
- łatwiej jest współpracować z czujnikami i źródłami o dużej impedancji.

Mały szum wejściowy przy źródłach sygnału o dużej impedancji

Dlatego bywa bardzo często stosowany jako pierwszy tranzystor w torze pomiarowym.

Tranzystory polowe z izolacją bramki - MOSFET

W praktyce spotyka się tylko tranzystory MOSFET z kanałem wzbożonym (enhancement mode).

Te typowe MOSFET-y działają podobnie, tranzystory bipolarne:

- gdy bramka jest zwarta do źródła – tranzystor nie przewodzi,
- gdy na bramkę zostanie podane napięcie o „właściwej” polaryzacji – przewodzi.

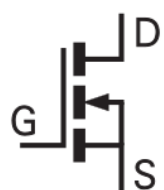
Co ważne, to napięcie nie jest ujemne, jak w JFET-ach.



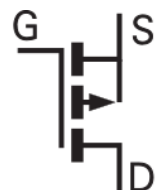
MOSFET N



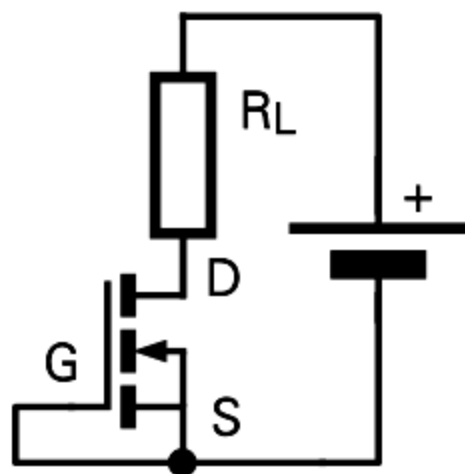
MOSFET P



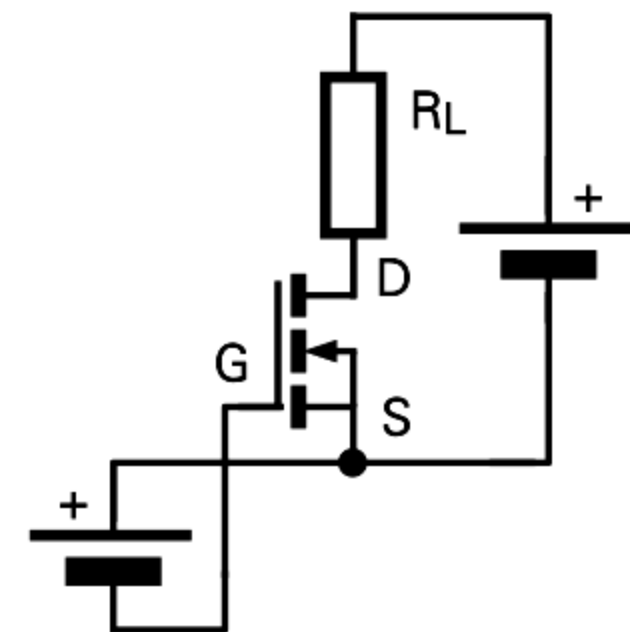
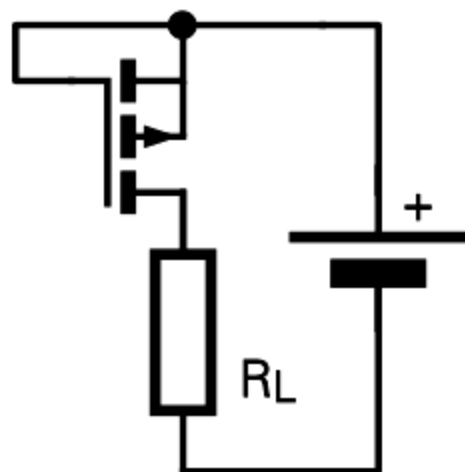
MOSFET N



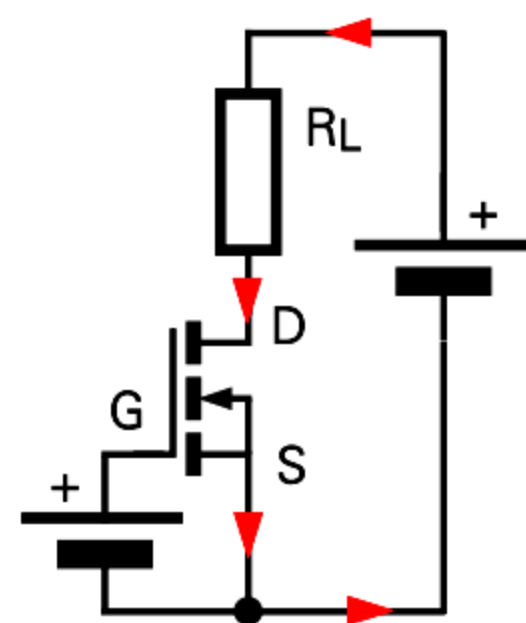
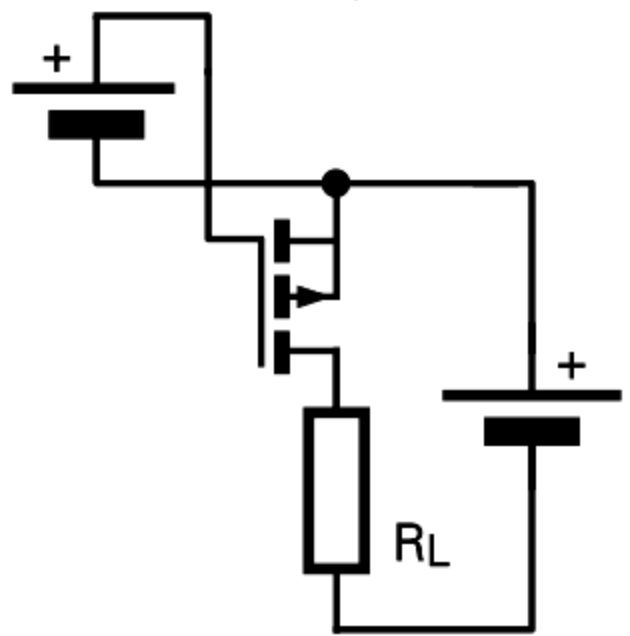
MOSFET P



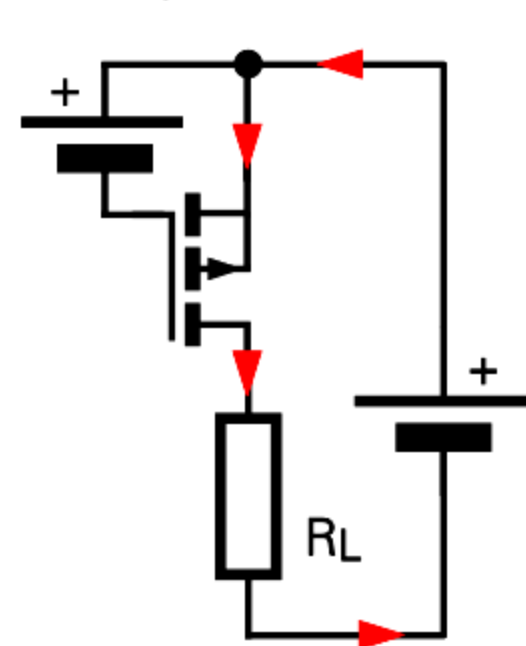
nie przewodzi



nie przewodzi



przewodzi



Bramka jest odizolowana od przewodzącego prąd drenu za pomocą dwutlenku krzemu (oznacza to, że między bramką a drenem tworzy się kondensator).

- **Obwód bramki nie pobiera więc prądu.**

Mamy więc do czynienia ze sterowaniem napięciowym.

- MOSFET jest też bardzo szybki – zmiana napięcia na bramce powodują zmianę prądu w ciągu nanosekund.

Są to kluczowe zalety MOSFETów.

Właściwości tranzystorów MOSFET

Najważniejszymi parametrami MOSFET-a są:

- dopuszczalne napięcie dren-źródło, oznaczane U_{DSmax}
- maksymalny prąd drenu I_{Dmax}
- napięcie progowe otwierania, oznaczane U_{Gsth}
- rezystancja między drenem a źródłem w stanie (całkowitego) otwarcia R_{DSon} .

Sens pierwszego parametru jest oczywisty - zbyt duże napięcie dren-źródło spowoduje przebicie i nieodwracalne uszkodzenie tranzystora.

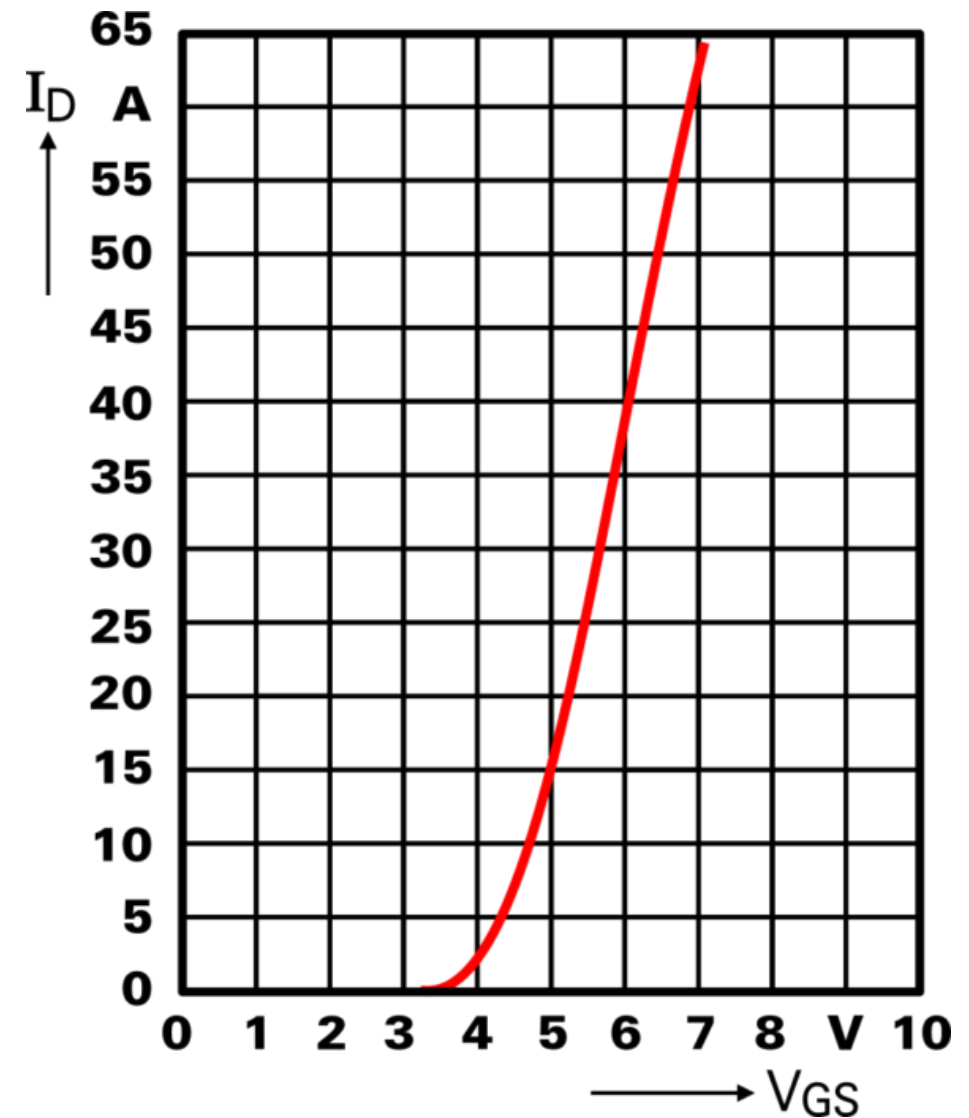
Drugi parametr też nie budzi wątpliwości – przy zbyt dużym prądzie w tranzystorze przepaleniu może ulec nie tylko struktura, ale i wewnętrzne połączenia. Trzeba tylko pamiętać, iż w katalogu obok maksymalnego ciągłego prądu drenu podaje się też znacznie większy prąd szczytowy (impulsowy).

Trzeci parametr również jest łatwy do zrozumienia. U_{GStH} to napięcie bramka–źródło, przy którym tranzystor zaczyna się otwierać, a konkretnie, gdy prąd drenu ma wartość 1 mA.

Można przyjąć, że przy napięciach bramki mniejszych niż U_{GStH} tranzystor jest całkowicie zatkany – prąd drenu nie płynie, a rezystancja między drenem a źródłem – R_{DS} – jest ogromna.

Przy zwiększaniu napięcia powyżej U_{GStH} tranzystor otwiera się coraz bardziej, a rezystancja R_{DS} maleje.

Nie można jej jednak zmniejszyć do zera, a jedynie do wartości rzędu ułamków oma lub pojedynczych omów.



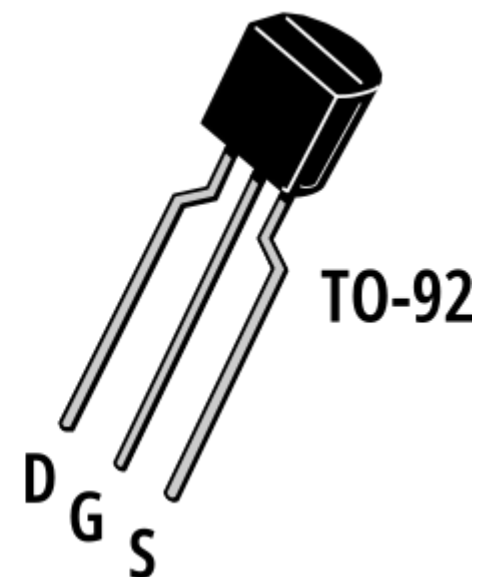
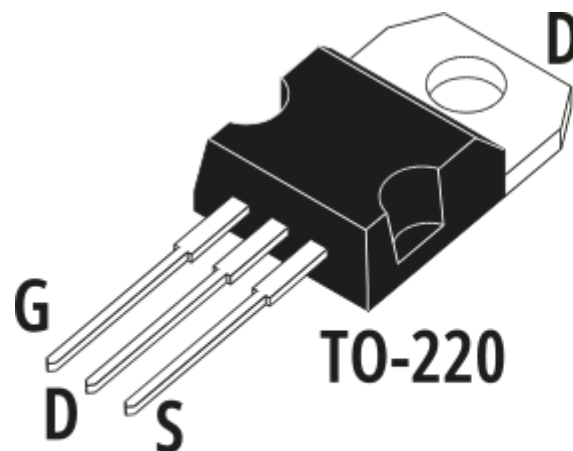
I to jest właśnie czwarty parametr -najmniejsza rezystancja w pełni otwartego tranzystora.

Podaną w katalogu rezystancję R_{DSon} uzyskuje się przy napięciu bramki (U_{GS}), równym zazwyczaj 10 V.

Zwiększenie napięcia U_{GS} do 15 V nie zaszkodzi, ale i nie zmniejszy już znacząco rezystancji R_{Dson} .

Zakres dopuszczalnych napięć U_{gs} wynosi dla praktycznie wszystkich MOSFET-ów $\pm 15... \pm 20$ V.

Kanał	Typ	U_{DSmax} [V]	I_{Dmax} [A]	R_{DSon} [Ω]
N	BUZ10	50	23	0,07
N	BUZ11	70	30	0,04
N	BUZ71A	50	12	0,12
N	BUZ74	500	2,4	3
N	BUZ74A	500	2,1	4
N	BUZ77A	600	2,1	4
N	BUZ90	600	4,5	1,6
N	IRF520	100	9,2	0,27
N	IRF530	100	14	0,16
N	IRF540	100	28	0,077
N	IRF640	200	18	0,18
N	IRF740	400	10	0,55
N	IRF840	500	8	0,85
P	BUZ171	50	8	0,3
P	BUZ271	50	22	0,15
P	BUZ172	100	5	0,6
P	BUZ173	200	3	1,5
P	IRF9530	100	12	0,3
P	IRF9540	100	19	0,2



Kanał	Typ	U_{DSmax}	I_{Dmax}	R_{DSon}
N	BS170	60	0,3	5
N	BS107	200	0,13	26
N	VN0300L	60	1	1,2
N	VN2406L	240	0,5	6
N	VN2410L	240	0,5	10
P	BS208	200	0,2	14
P	BS250	45	0,18	14
P	BSS92	200	0,15	20
P	BSS84	50	0,13	10

Oczywiście ideałem byłby tranzystor MOSFET o jak największym napięciu U_{DSmax} i jak najmniejszej rezystancji R_{DSon} .

Niestety, rezystancja R_{DSon} jest zdecydowanie większa w tranzystorach o wyższym dopuszczalnym napięciu U_{DSmax} . W praktyce oznacza to, że nie warto stosować MOSFET-ów z większym niż to konieczne napięciem U_{DSmax} .

Przykład:

Jeśli przez w pełni otwarty tranzystor BUZ11 popłynie ciągły prąd o wartości 5 A, to napięcie U_{DS} wyniesie:

$$U_{DS} = 0,04 \, \Omega \times 5 \, A = 200 \, mV$$

Straty mocy wyniosą:

$$P = 200 \, mV \times 5 \, A = 1 \, W$$

Tranzystor w obudowie TO-220 bez radiatora może rozproszyć: 1...1,5 W mocy strat.

Jeśli jednak przy takim samym prądzie miałby pracować tranzystor BUZ173 (100 V, 5A, 0,6 Ω), wtedy spadek napięcia wyniesie $5 \, A \times 0,6 \, \Omega = 3 \, V$, a straty mocy 15 W...

Choć tranzystor MOSFET zaczyna się otwierać przy pewnym napięciu U_{GStH} , to jednak do pełnego otwarcia jest wymagane napięcie znacząco większe niż U_{GStH} . Niektóre tranzystory potrzebują trochę więcej napięcia U_{GS} , by prąd wzrósł np. o 1 A, inne trochę mniej.

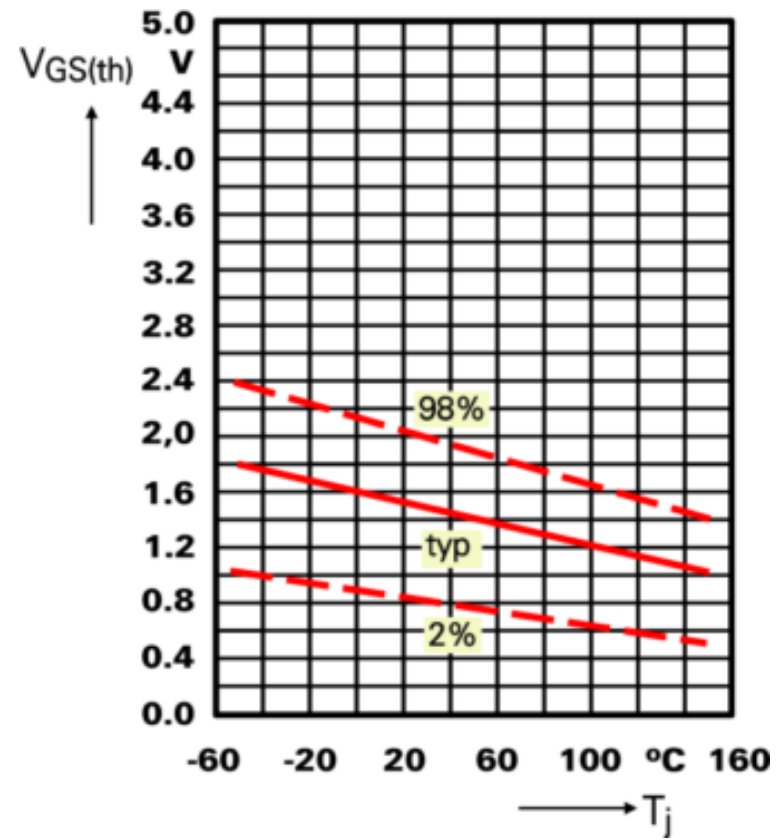
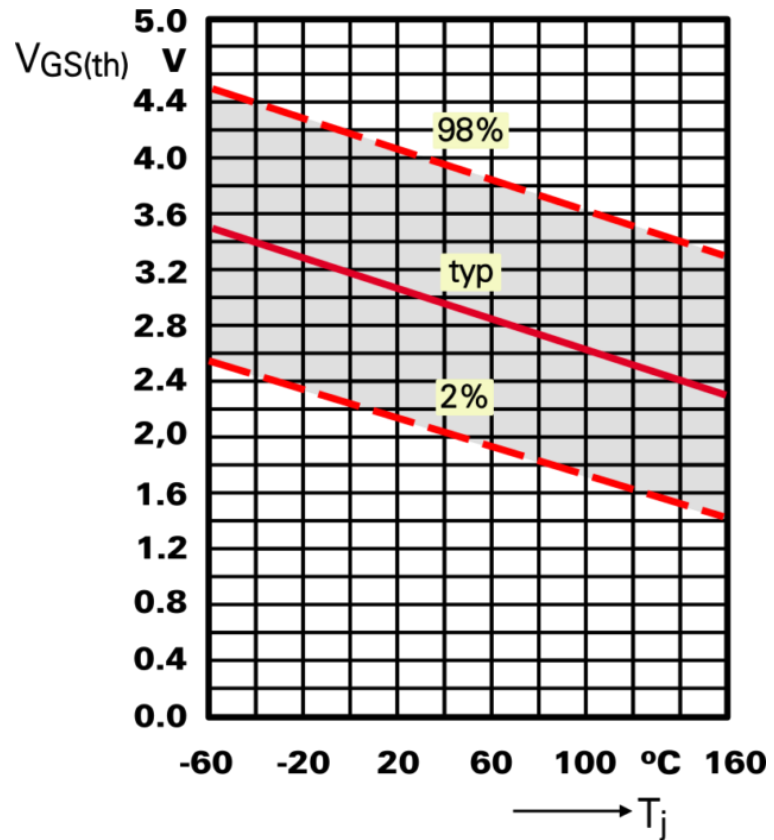
Ponieważ MOSFET-y najczęściej pracują dwustanowo (jako przełączniki) ważniejsza jest informacja, jakie napięcie jest wymagane, żeby go w pełni otworzyć!

Jeśli na przykład jakiś egzemplarz BUZ11 będzie miał napięcie progowe 4 V, to do jego pełnego otwarcia nie wystarczy napięcie 5 V, typowe dla wielu układów cyfrowych.

W przypadku tranzystorów małej mocy, np. BS170, nie ma tego problemu, bo napięcie U_{GStH} nie przekracza 2,4 V.

Wniosek jest prosty - napięcie 5 V jest za małe do pełnego otwarcia niektórych egzemplarzy MOSFET-ów mocy.

I jeszcze rzut oka na dwie przykładowe noty katalogowe w kontekście progu...



Zastosowania tranzystorów MOSFET

Elektronika mocy

- przetwornice DC/DC,
- zasilacze impulsowe,
- sterowniki silników,
- klucze mocy,
- PWM,
- przełączanie dużych prądów,
- mostki H,
- energoelektronika.

Dlaczego

Bo MOSFET świetnie nadaje się do pracy przełączającej:

- ma bardzo mały prąd sterowania bramką,
- może mieć małą rezystancję w stanie przewodzenia,
- daje wysoką sprawność.

Zastosowania tranzystorów MOSFET

Układy cyfrowe

Współczesna logika scalona jest oparta głównie na MOSFET-ach, zwłaszcza CMOS:

- procesory,
- pamięci,
- mikrokontrolery,
- bramki logiczne,
- układy VLSI.

Przełączniki analogowe i klucze

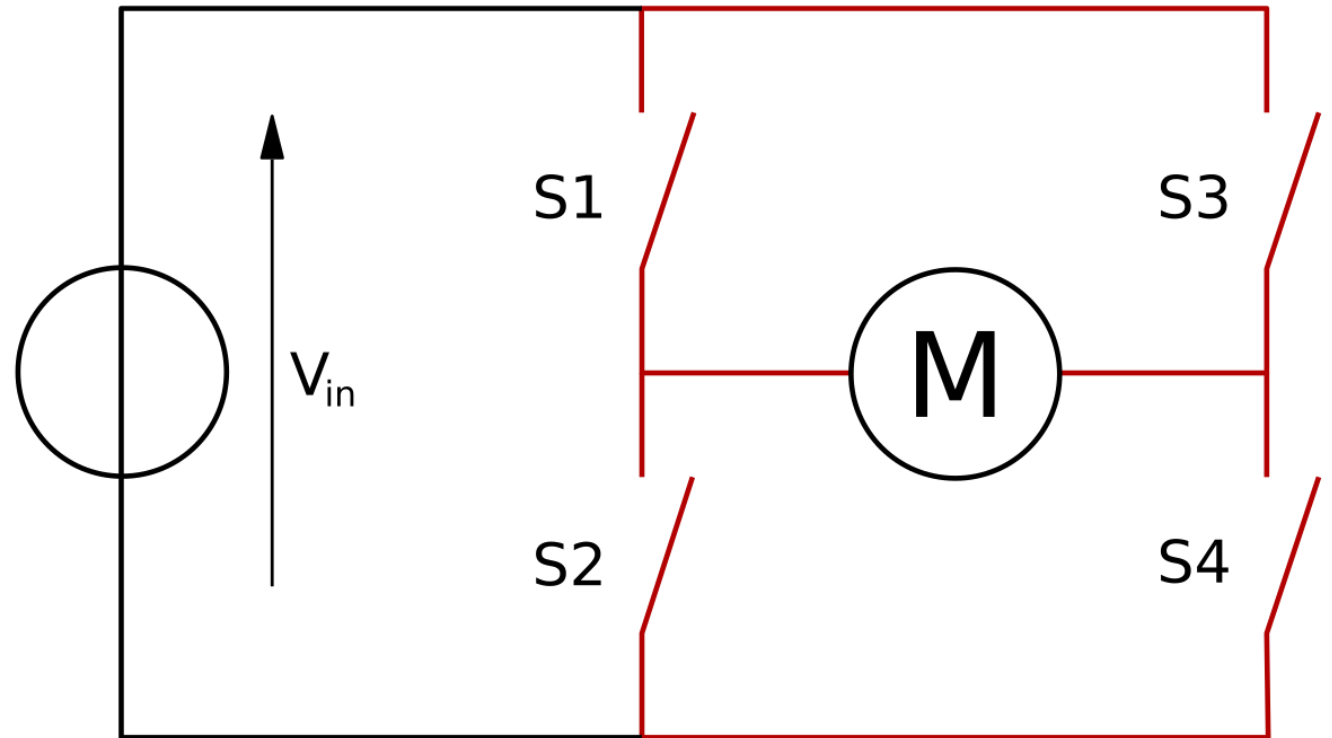
MOSFET bardzo dobrze sprawdza się jako:

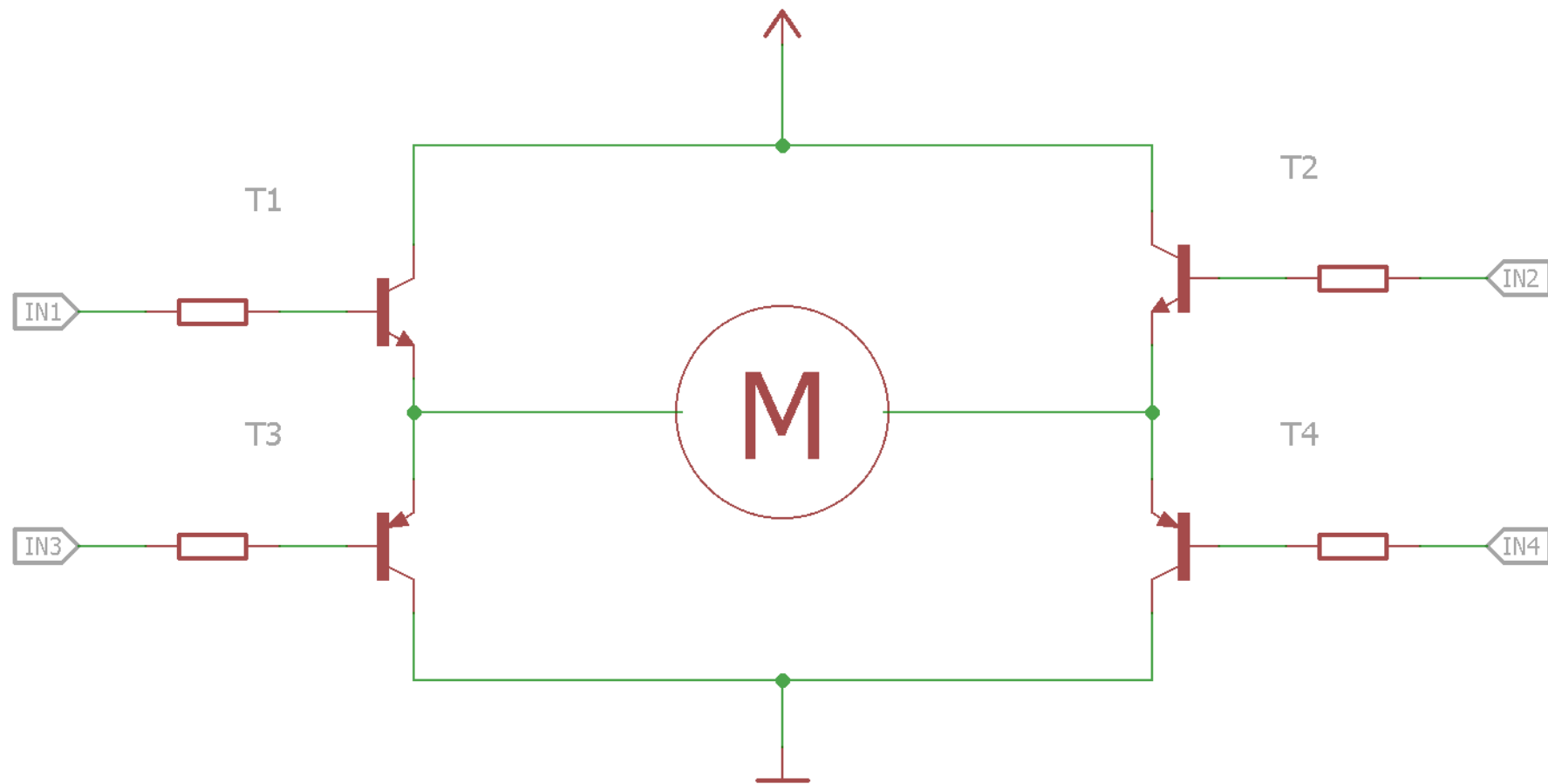
- klucz,
- element przełączający.

Mostek H

Mostek H jest zbudowany z 4 styków:

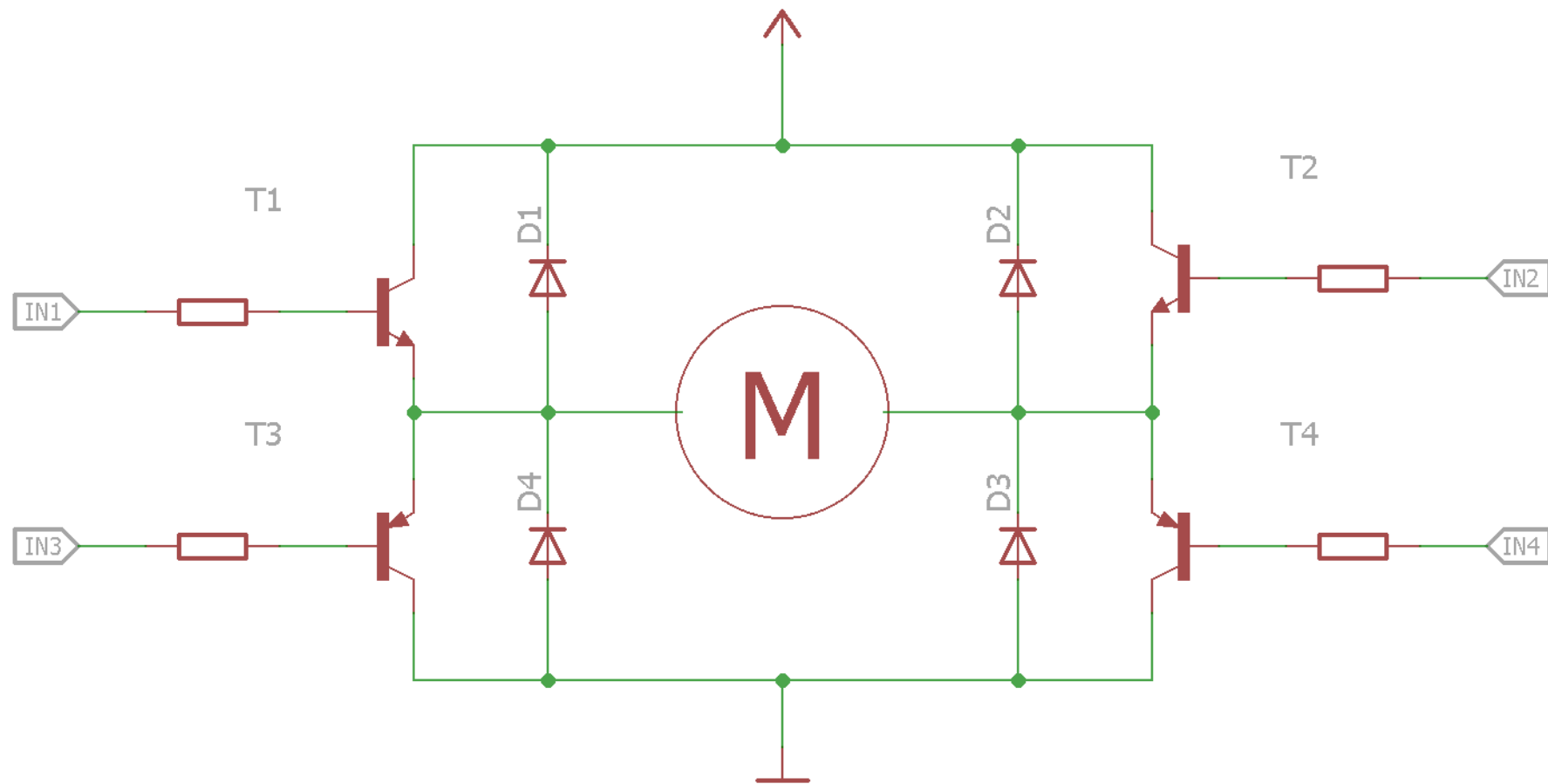
- kiedy styki S1 i S4 są zamknięte, a S2 i S3 otwarte, do silnika doprowadzone jest napięcie i zacznie się on obracać;
- poprzez otwarcie styków S1 i S4 oraz zamknięcie S2 i S3 zmieniamy kierunek przepływu prądu, tym samym zmieniając kierunek obrotów.





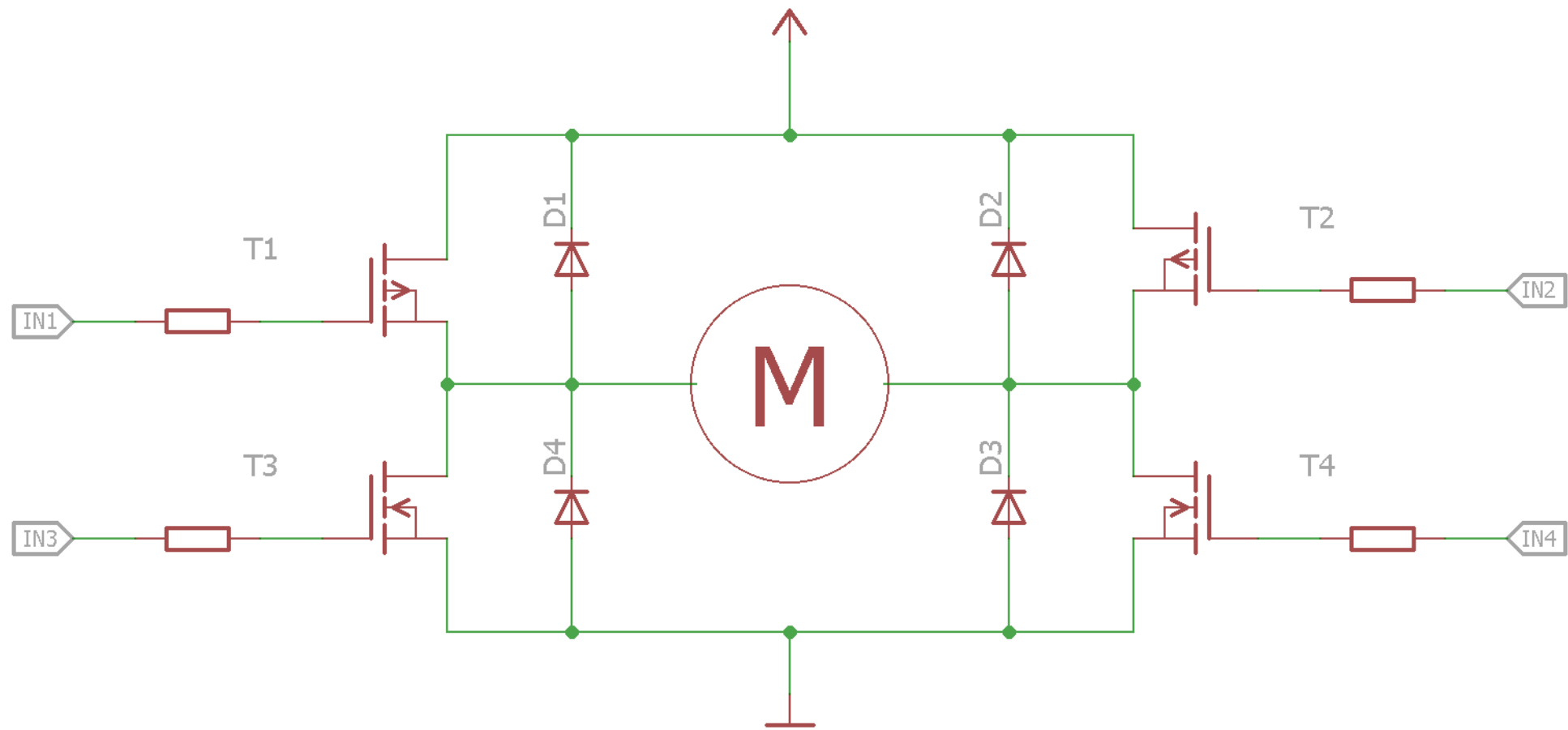
Układ podstawowy - problem:

- indukcyjne obciążenie...



Układ z diodami - problem:

- spadek napięcia na złączu kolektor-emiter...



Układ najsensowniejszy...

Mostki scalone: L298



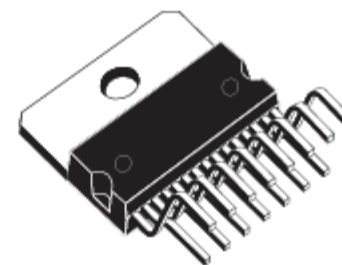
L298

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

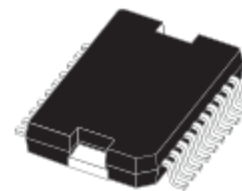
- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



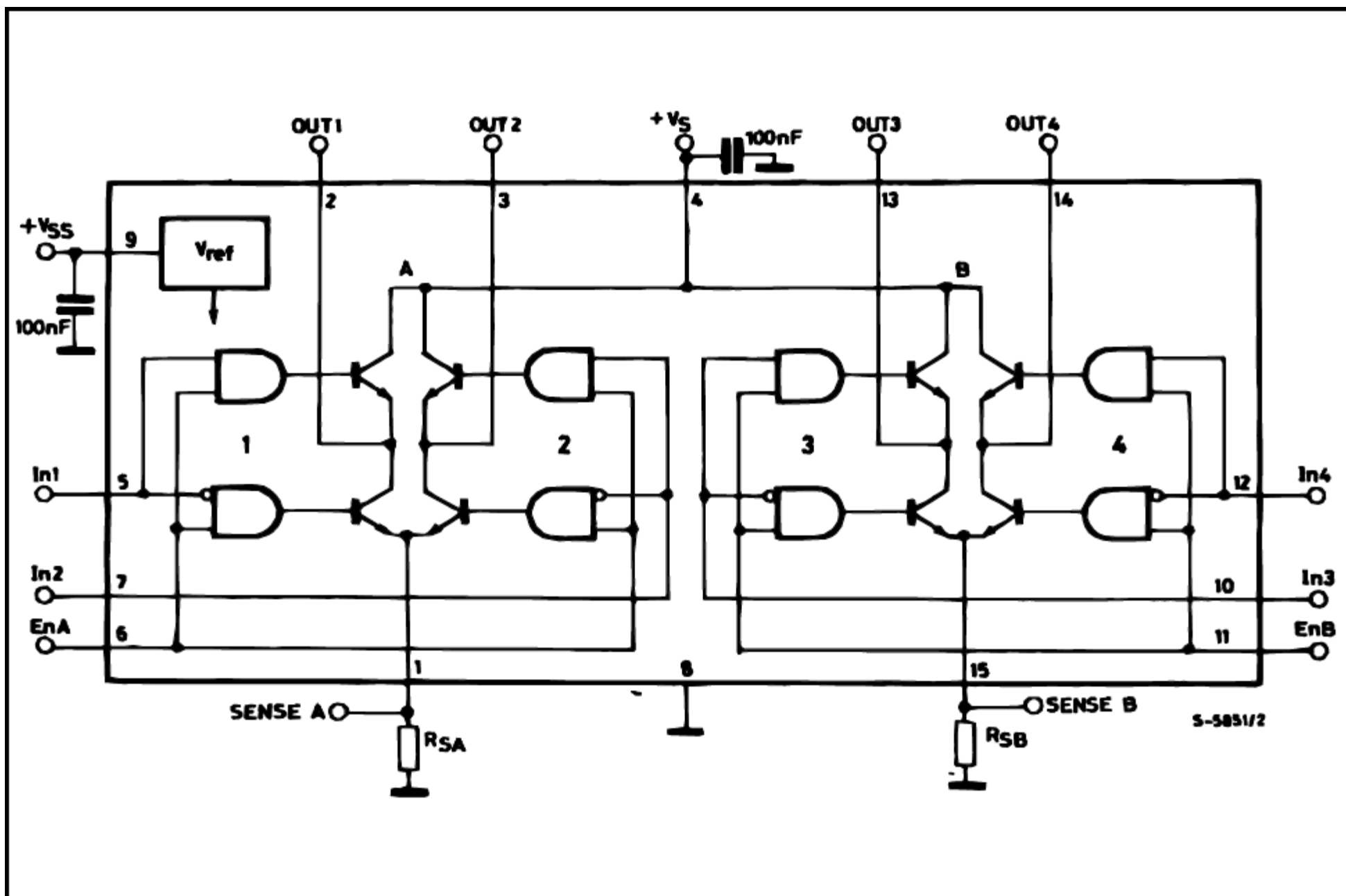
Multiwatt15



PowerSO20

ORDERING NUMBERS : L298N (Multiwatt Vert.)
L298HN (Multiwatt Horiz.)
L298P (PowerSO20)

nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.



DRV8833 Dual H-Bridge Motor Driver

Mostki scalone: DRV8833

1 Features

- Dual-H-Bridge Current-Control Motor Driver
 - Can Drive Two DC Motors or One Stepper Motor
 - Low MOSFET ON-Resistance: HS + LS 360 mΩ
- Output Current (at $V_M = 5\text{ V}$, 25°C)
 - 1.5-A RMS, 2-A Peak per H-Bridge in PWP and RTY Package Options
 - 500-mA RMS, 2-A Peak per H-Bridge in PW Package Option
- Outputs can be in Parallel for
 - 3-A RMS, 4-A Peak (PWP and RTY)
 - 1-A RMS, 4-A Peak (PW)
- Wide Power Supply Voltage Range: 2.7 to 10.8 V
- PWM Winding Current Regulation and Current Limiting
- Thermally Enhanced Surface-Mount Packages

2 Applications

- Battery-Powered Toys
- POS Printers
- Video Security Cameras
- Office Automation Machines
- Gaming Machines
- Robotics

3 Description

The DRV8833 device provides a dual bridge motor driver solution for toys, printers, and other mechatronic applications.

The device has two H-bridge drivers, and can drive two DC brush motors, a bipolar stepper motor, solenoids, or other inductive loads.

The output driver block of each H-bridge consists of N-channel power MOSFETs configured as an H-bridge to drive the motor windings. Each H-bridge includes circuitry to regulate or limit the winding current.

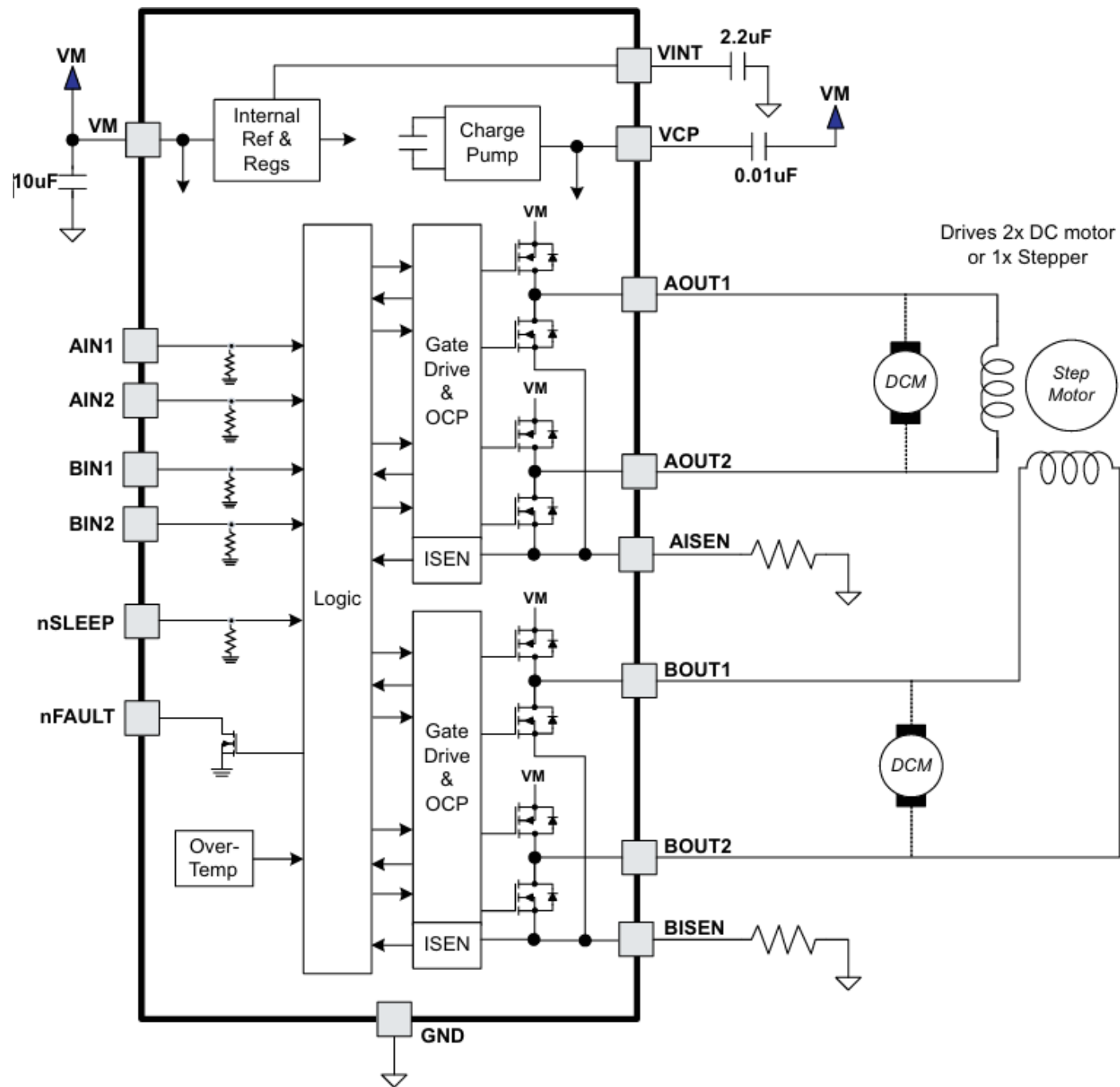
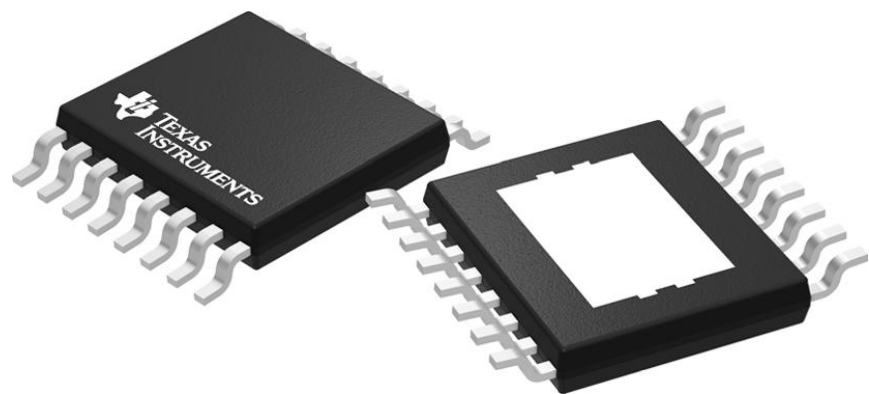
Internal shutdown functions with a fault output pin are provided for overcurrent protection, short-circuit protection, undervoltage lockout, and overtemperature. A low-power sleep mode is also provided.

The DRV8833 is packaged in a 16-pin WQFN package with PowerPAD™ (Eco-friendly: RoHS & no Sb/Br).

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
DRV8833	TSSOP (16)	5.00 mm × 4.40 mm
	HTSSOP (16)	5.00 mm × 4.40 mm
	WQFN (16)	4.00 mm × 4.00 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.



Simplified Schematic

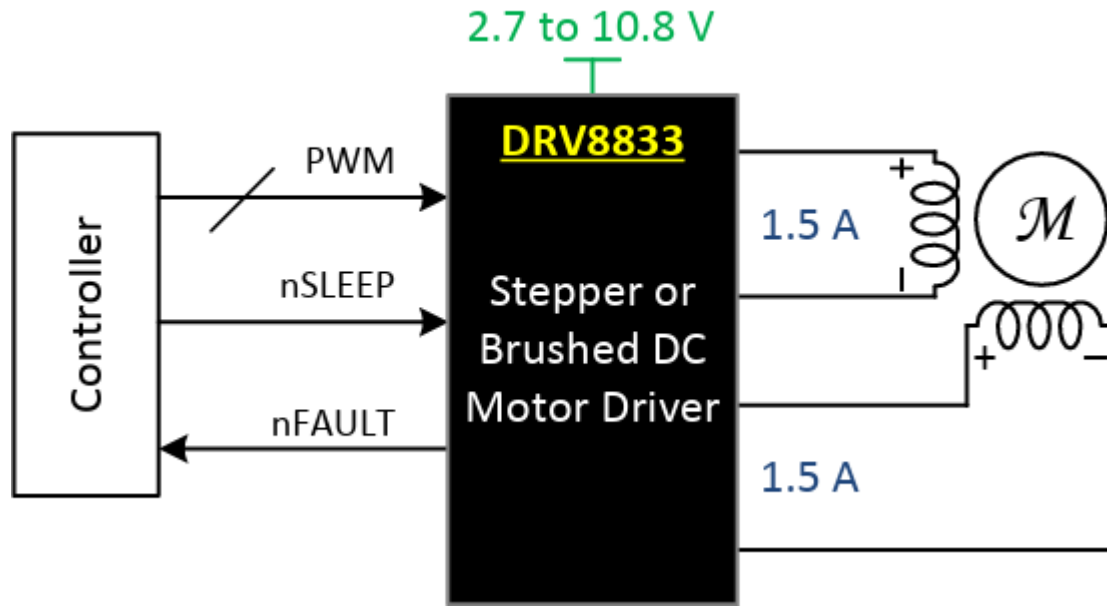


Table 2. PWM Control of Motor Speed

xIN1	xIN2	FUNCTION
PWM	0	Forward PWM, fast decay
1	PWM	Forward PWM, slow decay
0	PWM	Reverse PWM, fast decay
PWM	1	Reverse PWM, slow decay

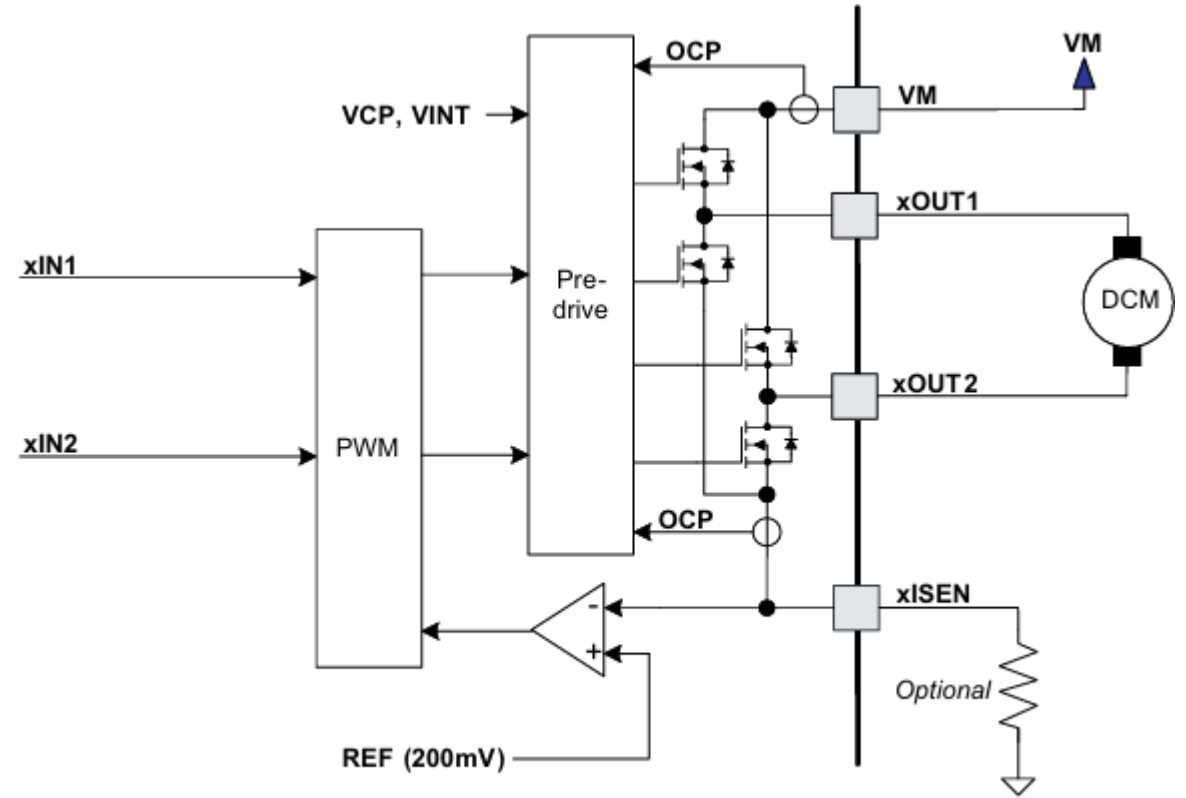
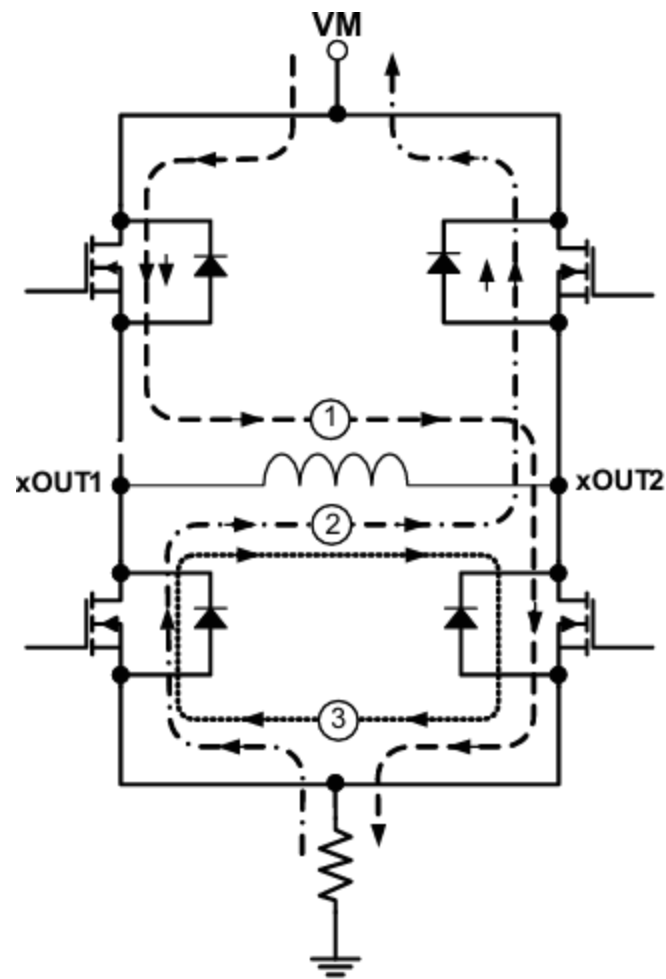
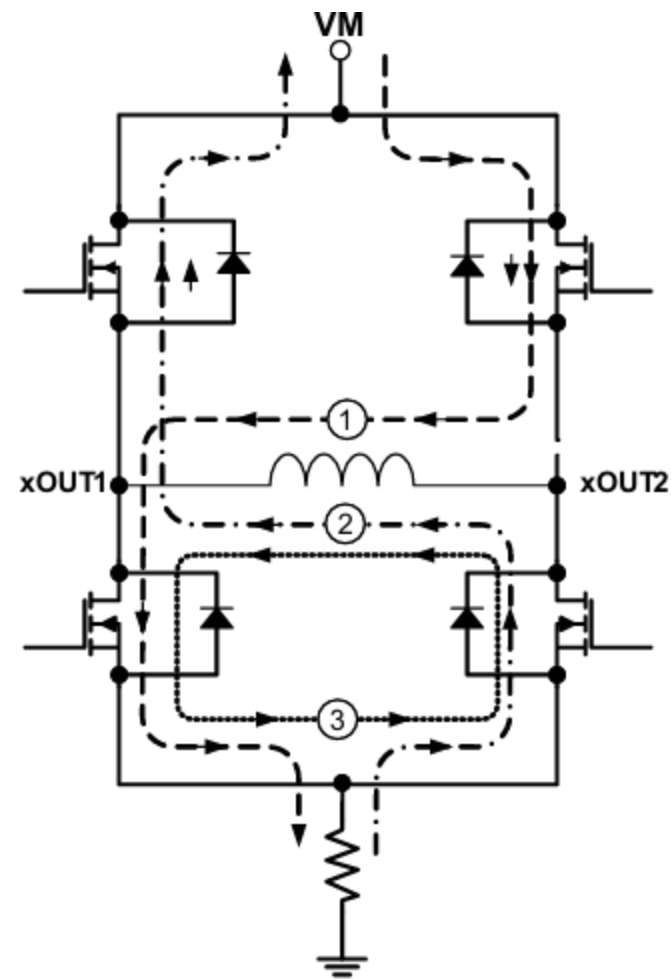


Figure 5. Motor Control Circuitry



- ① Forward drive
- ② Fast decay
- ③ Slow decay

FORWARD



- ① Reverse drive
- ② Fast decay
- ③ Slow decay

REVERSE

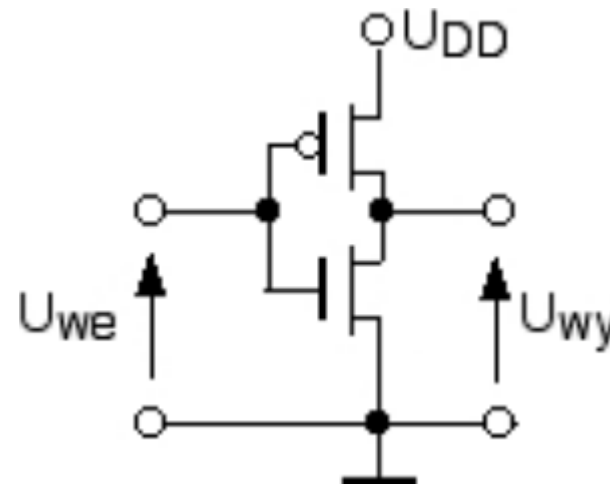
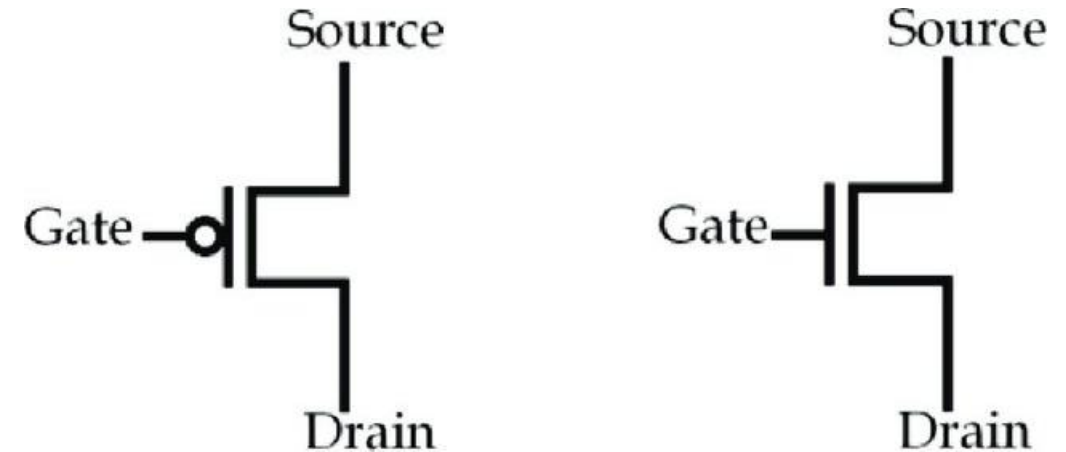
Figure 6. Drive and Decay Modes

Układy cyfrowe PMOS/NMOS/CMOS

Tranzystory PMOS (lewy) i NMOS (prawy) to dwa główne typy tranzystorów MOS stosowanych w mikroprocesorach:

- tranzystory PMOS przy niskim napięciu bramki,
- tranzystory NMOS włączają się przy wysokim napięciu bramki.

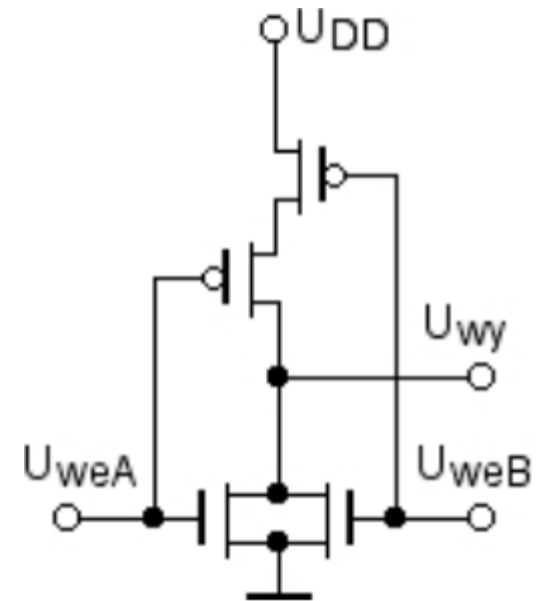
Razem tworzą podstawę dla tworzenia układów logicznych CMOS.



W przypadku pokazanej bramki stan "1" na dowolnym z wejść, A lub B, włącza odpowiedni tranzystor nMOS i wyłącza odpowiedni tranzystor pMOS.

W tym stanie wyjście jest uziemione i panuje na nim stan "0".

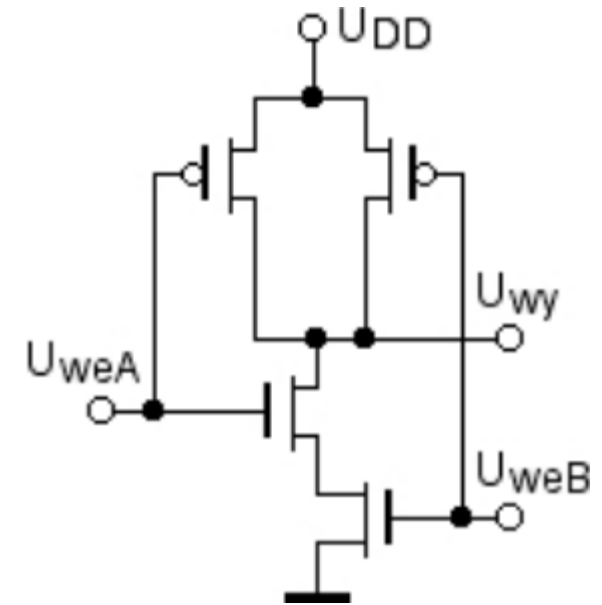
Tylko w przypadku zer na obu wejściach oba tranzystory nMOS są wyłączone, a oba tranzystory pMOS - włączone. Wyjście jest wówczas połączone ze źródłem zasilania i panuje na nim stan "1".



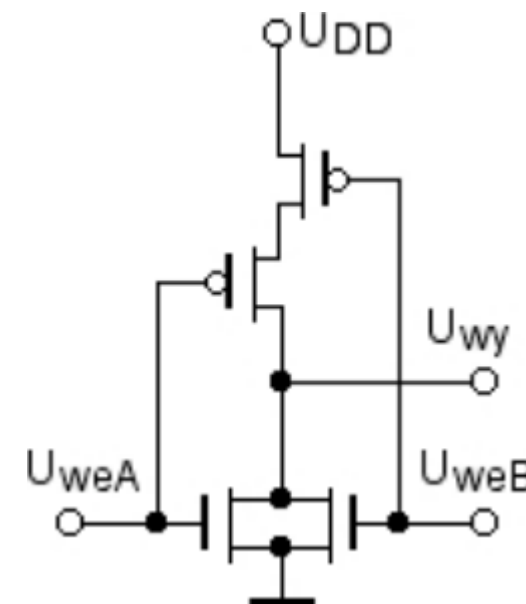
Działanie kolejnej bramki jest podobne: stan "0" na dowolnym z wejść, A lub B, włącza odpowiedni tranzystor pMOS i wyłącza odpowiedni tranzystor nMOS.

Wyjście jest wówczas połączone ze źródłem zasilania i panuje na nim stan "1".

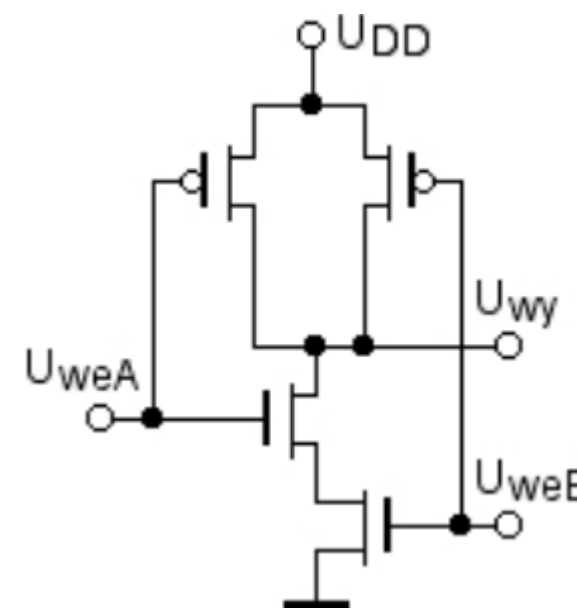
Tylko w przypadku jedynek na obu wejściach oba tranzystory nMOS są włączone, a oba tranzystory pMOS - wyłączone. W tym stanie wyjście jest uziemione i panuje na nim stan "0".



Zauważmy, że w bramce NOR przy żadnej kombinacji stanów wejściowych nie ma w stanie ustalonym przepływu prądu ze źródła zasilania, bowiem gdy któryś z połączonych równolegle tranzystorów nMOS (lub oba) jest włączony, to któryś z połączonych szeregowo tranzystorów pMOS (lub oba) jest wyłączony.



Również i w przypadku bramki NAND przy żadnej kombinacji stanów na wejściu nie ma w stanie ustalonym przepływu prądu ze źródła zasilania, bowiem gdy któryś z połączonych równolegle tranzystorów pMOS (lub oba) jest włączony, to któryś z połączonych szeregowo tranzystorów nMOS jest wyłączony (lub oba).



Dziękuję za uwagę