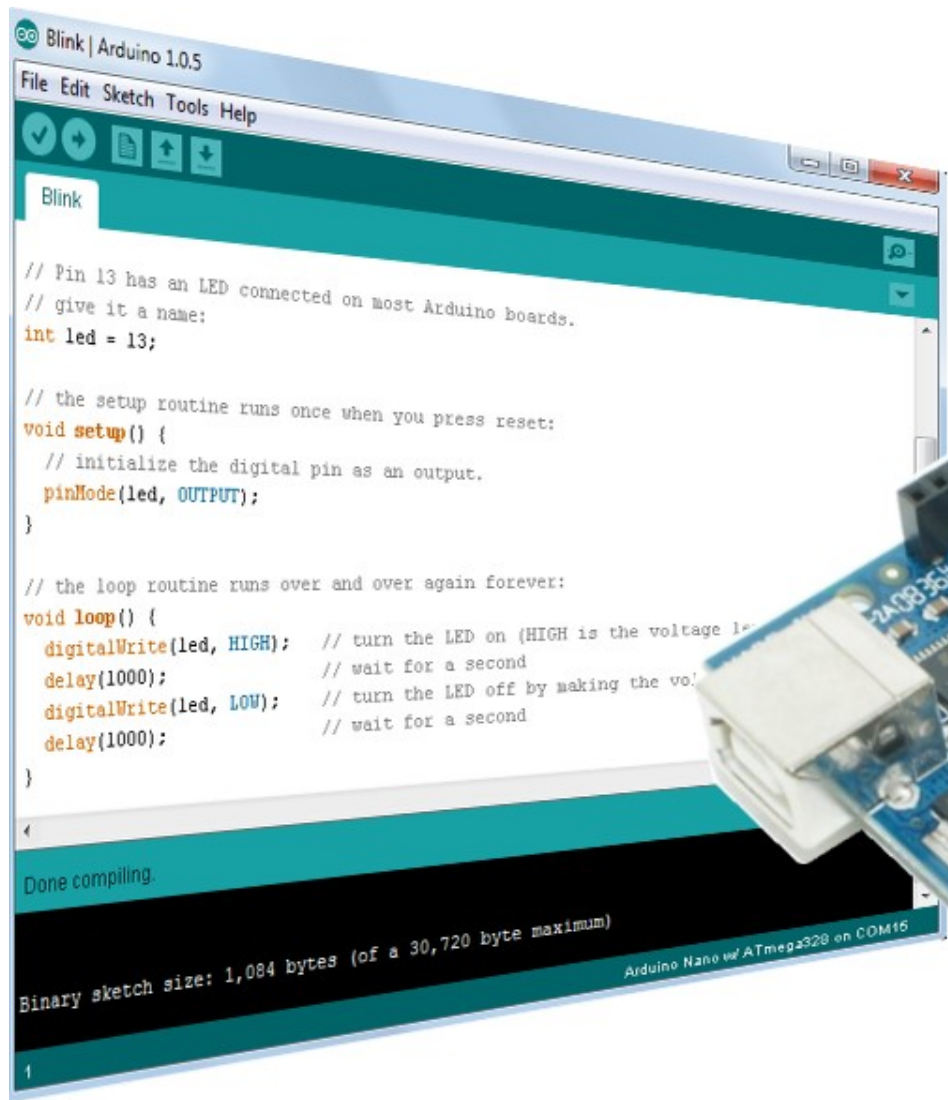


Arduino tanfolyam kezdőknek és haladóknak



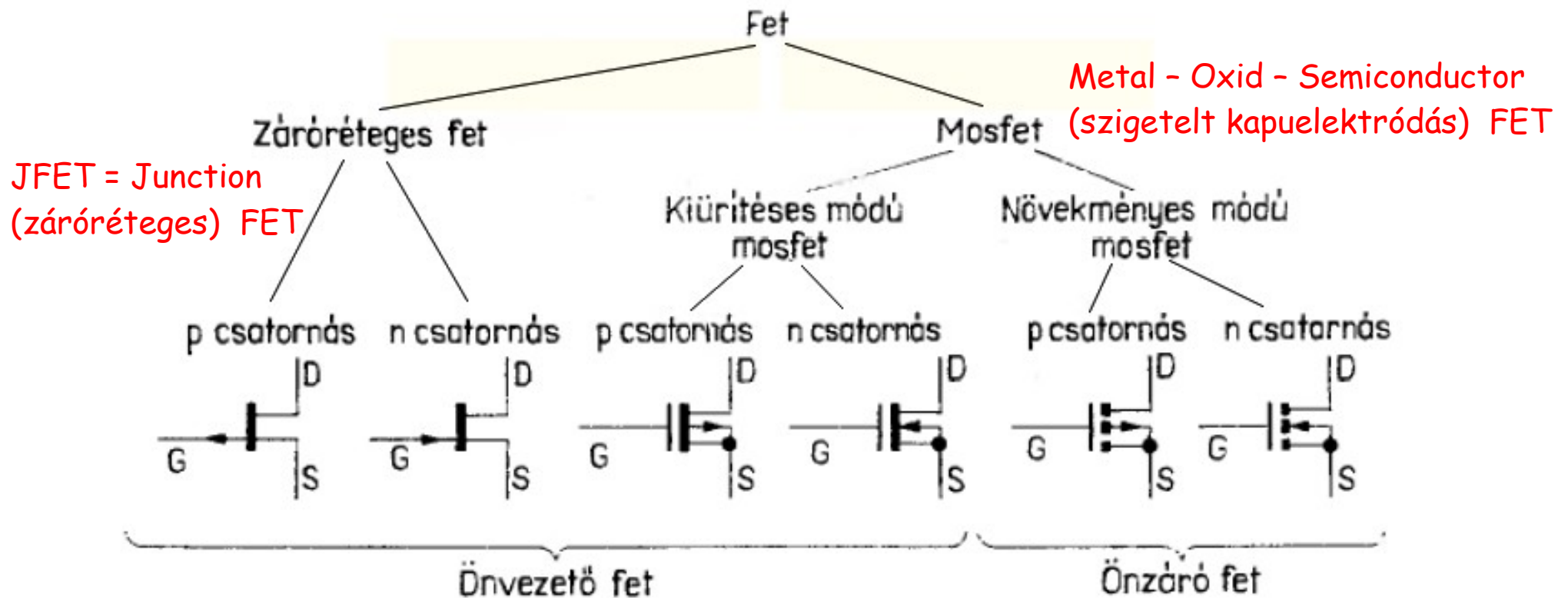
14. Tervezrlésű tranzisztorok (FET)

Felhasznált irodalom

- Sulinet Tudásbázis: [Unipoláris tranzisztorok](#)
- Electronics Tutorials: [The MOSFET](#)
- CONRAD Elektronik: [Elektronikai kísérletező készlet útmutatója](#)
- Talking Electronics: [The MOSFET](#)

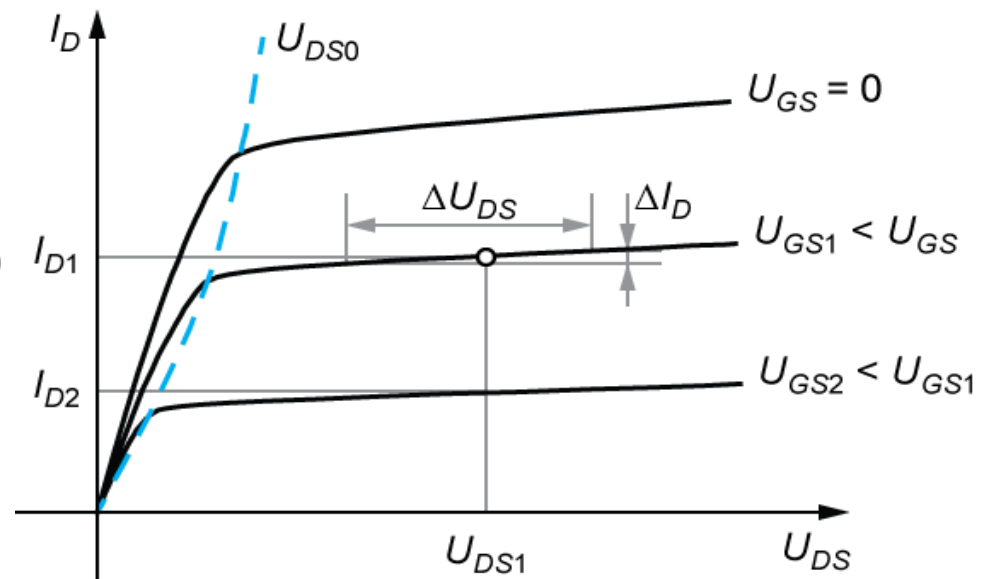
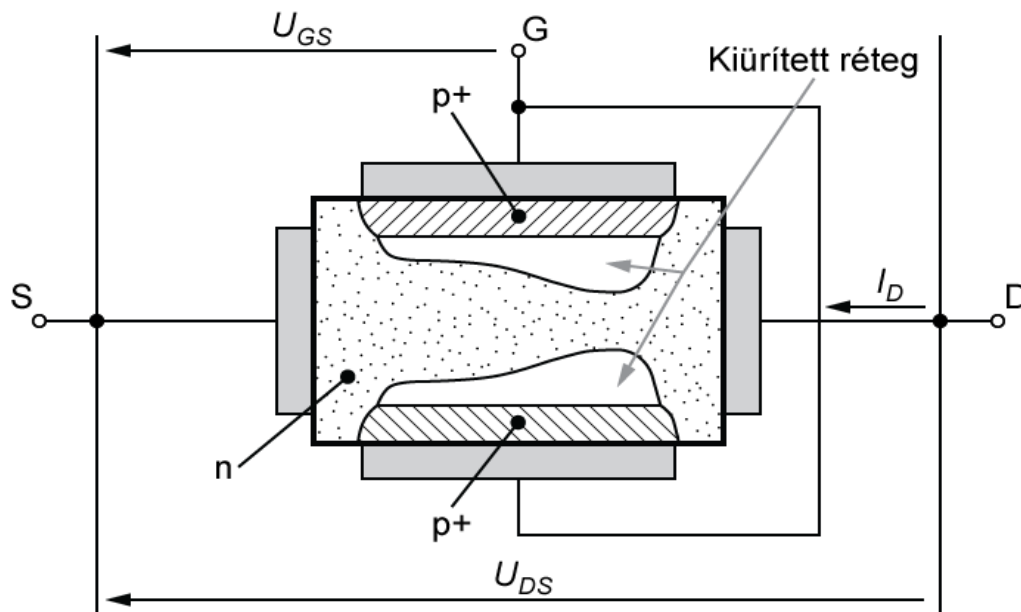
FET tranzisztorok

- FET = Field Effect Transistor, azaz **térvezérlésű tranzisztor**
- A **Drain** (nyelő) és **Source** (forrás) elektródák között folyó áramot a **Gate** (kapu) elektródára kapcsolt feszültség **elektromos tere** szabályozza. Sokféle fajtája van, melyek felépítésben, működésben és tulajdonságaikban eltérnek.



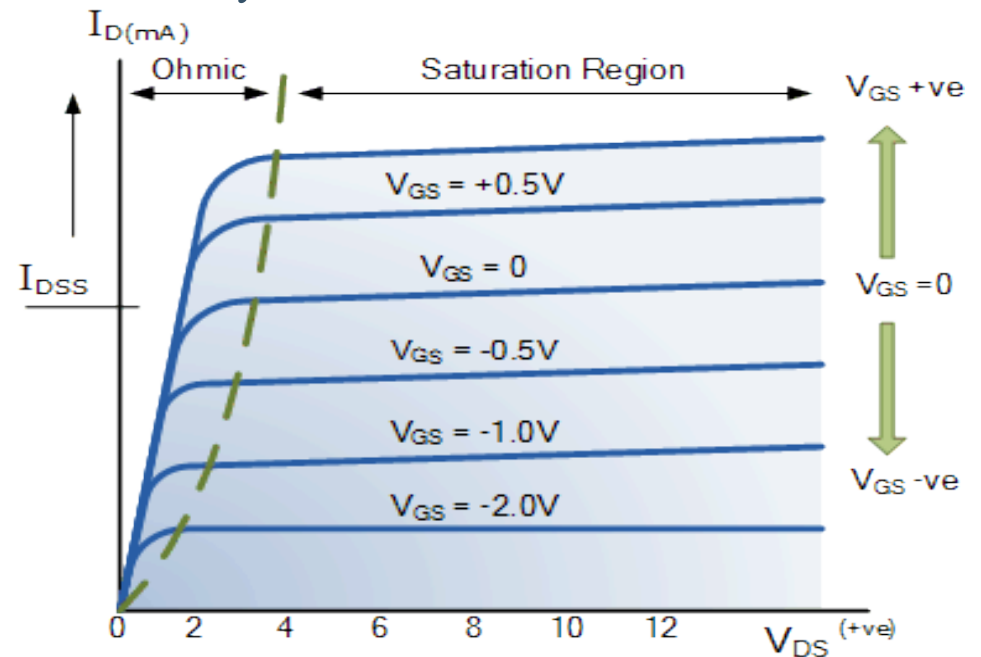
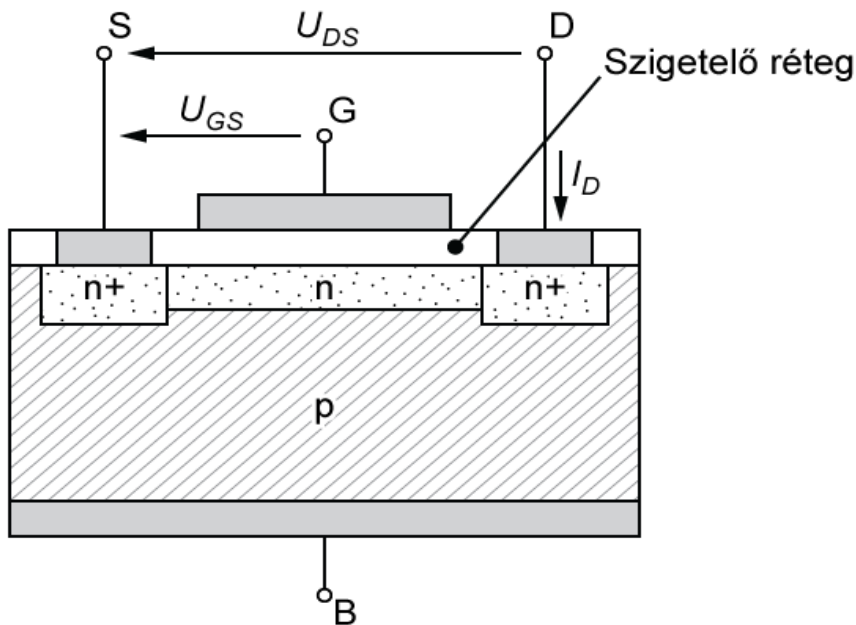
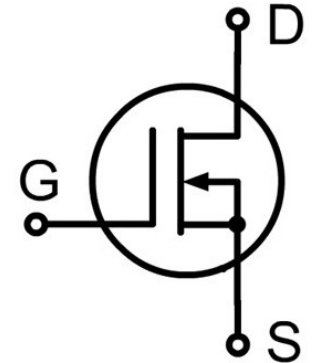
JFET (záróréteges FET)

- Az alábbi ábrákon egy n-csatornás tervezérlésű rétegtranzisztor (N-JFET) felépítését és működését mutatjuk be
- A **D** nyelő és az **S** forrás az n-típusú gyengén szennyezett félvezető csatorna végeire csatlakoznak. A **G** vezérlőelektróda a p-típusú réteghez csatlakozik. A záróirányú G-S előfeszítés növelése esetén a kiürített réteg kiterjeszkedik, s a D-S áram lecsökken (viselkedése és jelleggörbéje az elektroncsöves triódára hasonlít).



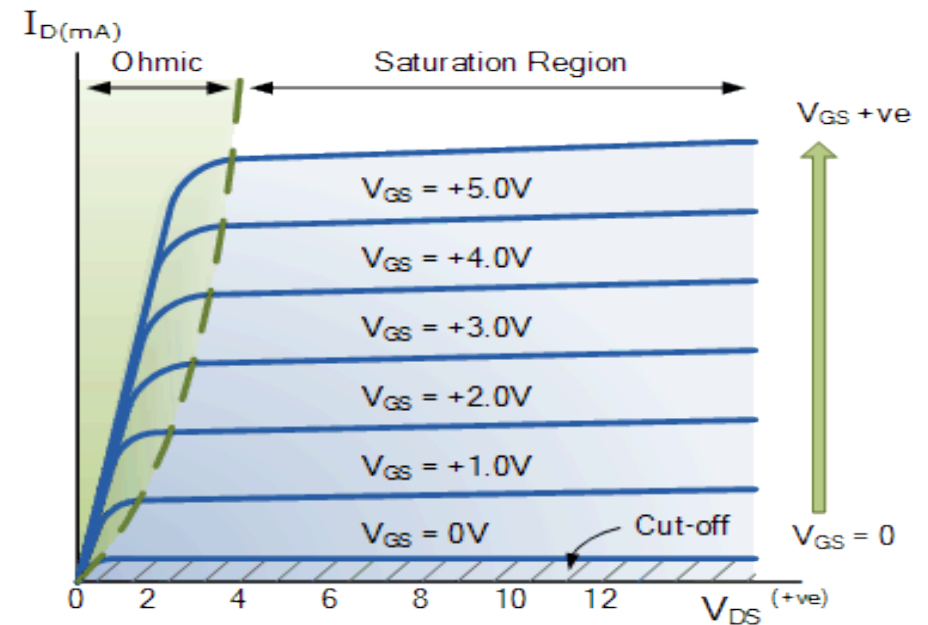
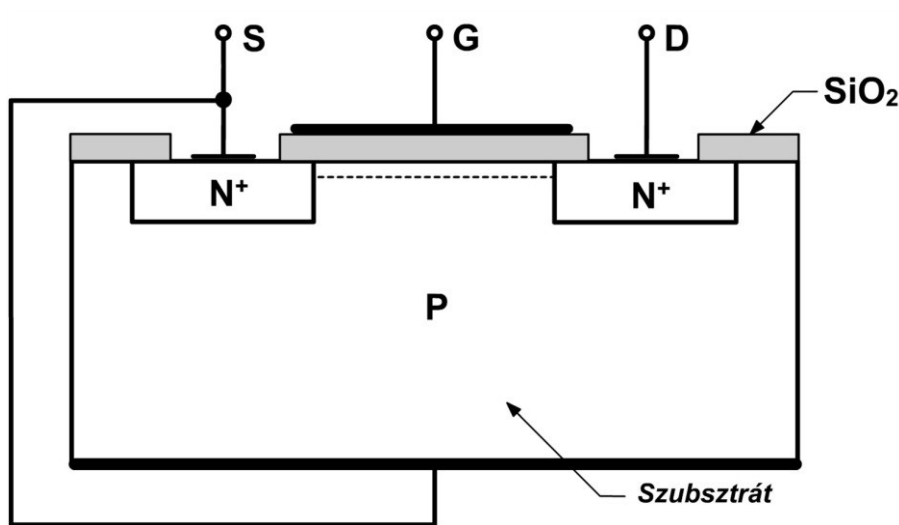
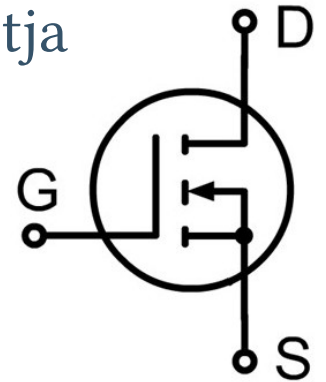
Önvezetéses (kiürítéses) MOS FET

- Pozitív G-S vezérlőfeszültség esetén a csatorna negatív töltéseket akumulál, mintha a szennyezettséget növeltük volna meg → a FET jobban vezet.
- Negatív G-S feszültség esetén a csatornában pozitív lyukak jelennek meg, amelyek az elektronokkal rekombinálnak → a FET kevésbé vezet
- Végeredményben a csatornában akumulált töltéshordozók számával szabályozzuk az eszköz működési tartományát



Önzáró (növekményes) MOS FET

- A szubsztrát p-típusú, gyengén szennyezett Si alapkristály, melyben két erősen szennyezett n-típusú vezető sziget alkotja a tranzisztor S (forrás) és D (nyelő) elektródáját
- A tranzisztor alaphelyzetben nem vezet. Ha a G (kapu) elektródára pozitív feszültséget kapcsolunk, a szubsztrát kisebbségi töltéshordozó elektronjai a szigetelőréteghez vándorolnak és az S és D elektróda között egy *n*-típusú vezetőcsatornát alkotnak



Adatlapok olvasása (BS170)

Absolute Maximum: az a határ, ahol tönkremegy az eszköz, ha átlépjük a megadott határértékeket!



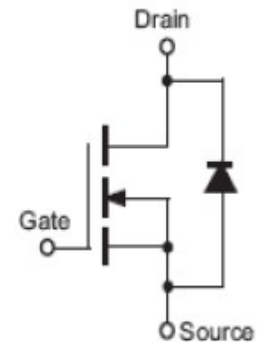
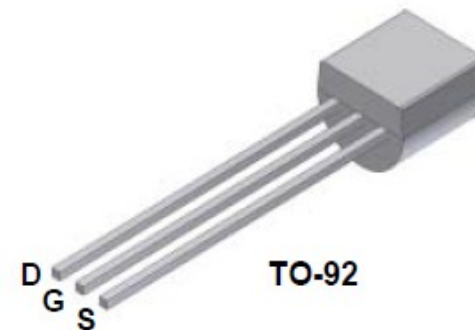
BS170 / MMBF170

N-Channel Enhancement Mode Field Effect Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	BS170	MMBF170	Units
V_{DSS}	Drain-Source Voltage	60		V
V_{DGR}	Drain-Gate Voltage ($R_{GS} \leq 1\text{M}\Omega$)	60		V
V_{GSS}	Gate-Source Voltage	± 20		V
I_D	Drain Current - Continuous	500	500	mA
	- Pulsed	1200	800	
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Temperature Range	- 55 to 150		$^\circ\text{C}$
T_L	Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes, 1/16" from Case for 10 Seconds	300		$^\circ\text{C}$

BS170

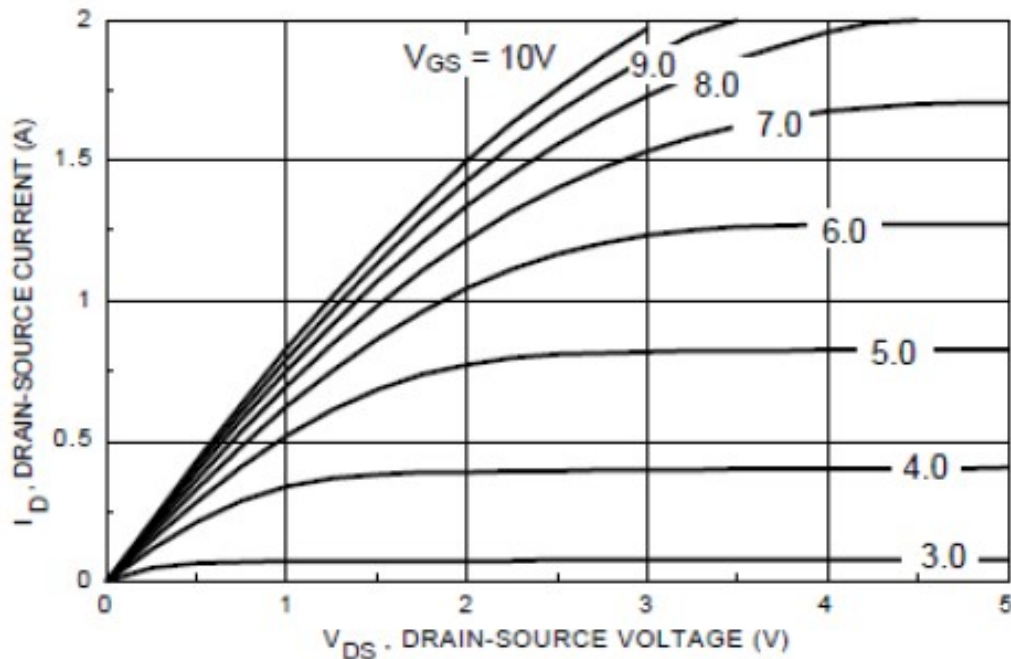


Adatlapok olvasása (BS170)

Electrical Characteristics $T_A=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Conditions	Type	Min.	Typ.	Max.	Units
OFF CHARACTERISTICS							
BV_{DSS}	Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{GS} = 0V, I_D = 100\mu A$	All	60			V
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current	$V_{DS} = 25V, V_{GS} = 0V$	All			0.5	μA
I_{GSSF}	Gate - Body Leakage, Forward	$V_{GS} = 15V, V_{DS} = 0V$	All			10	nA
ON CHARACTERISTICS (Notes 1)							
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 1mA$	All	0.8	2.1	3	V
$R_{DS(on)}$	Static Drain-Source On-Resistance	$V_{GS} = 10V, I_D = 200mA$	All		1.2	5	Ω

A **BS170** mint kapcsoló: 5 V-os jellel akár 0.5 A kapcsolható, 1 V maradékfeszültség mellett...



3,3 V-os jelszinttel csak kis (50 – 100 mA) kapcsolható!

9 – 10 V-os bemenőjel esetén minimális a maradékfeszültség ($U_{GS} < 1 V$)

Adatlapok olvasása (2N7000)

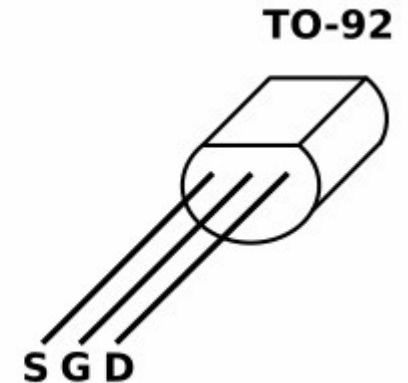
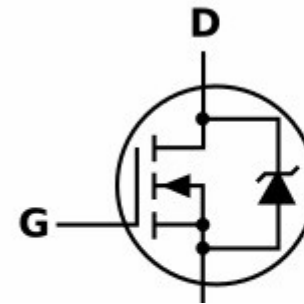
2N7000G

Small Signal MOSFET 200 mAmps, 60 Volts

N-Channel TO-92

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Drain Source Voltage	V_{DSS}	60	Vdc
Drain-Gate Voltage ($R_{GS} = 1.0 \text{ M}\Omega$)	V_{DGR}	60	Vdc
Gate-Source Voltage - Continuous - Non-repetitive ($t_p \leq 50 \mu\text{s}$)	V_{GS} V_{GSM}	± 20 ± 40	Vdc Vpk
Drain Current - Continuous - Pulsed	I_D I_{DM}	200 500	mAdc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	350 2.8	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

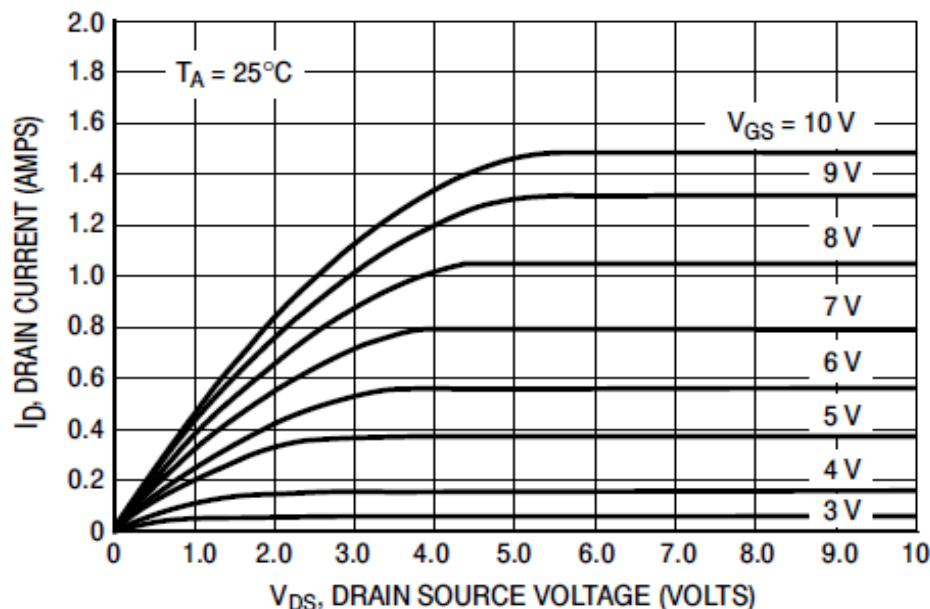
200 mAmps
60 VOLTS
 $R_{DS(on)} = 5 \Omega$

Adatlapok olvasása (2N7000)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Drain-Source Breakdown Voltage ($V_{GS} = 0, I_D = 10 \mu\text{A}_{dc}$)	$V_{(BR)DSS}$	60	-	Vdc
Zero Gate Voltage Drain Current ($V_{DS} = 48 \text{ Vdc}, V_{GS} = 0$) ($V_{DS} = 48 \text{ Vdc}, V_{GS} = 0, T_J = 125^\circ\text{C}$)	I_{DSS}	-	1.0	μA_{dc} mA _{dc}
Gate-Body Leakage Current, Forward ($V_{GSF} = 15 \text{ Vdc}, V_{DS} = 0$)	I_{GSSF}	-	-10	nA _{dc}
ON CHARACTERISTICS (Note 1)				
Gate Threshold Voltage ($V_{DS} = V_{GS}, I_D = 1.0 \text{ mA}_{dc}$)	$V_{GS(th)}$	0.8	3.0	Vdc
Static Drain-Source On-Resistance ($V_{GS} = 10 \text{ Vdc}, I_D = 0.5 \text{ A}_{dc}$) ($V_{GS} = 4.5 \text{ Vdc}, I_D = 75 \text{ mA}_{dc}$)	$r_{DS(on)}$	-	5.0 6.0	Ω

A **2N700** mint kapcsoló: 5 V-os jellel akár 0.2 A kapcsolható, 1 V maradékfeszültség mellett...

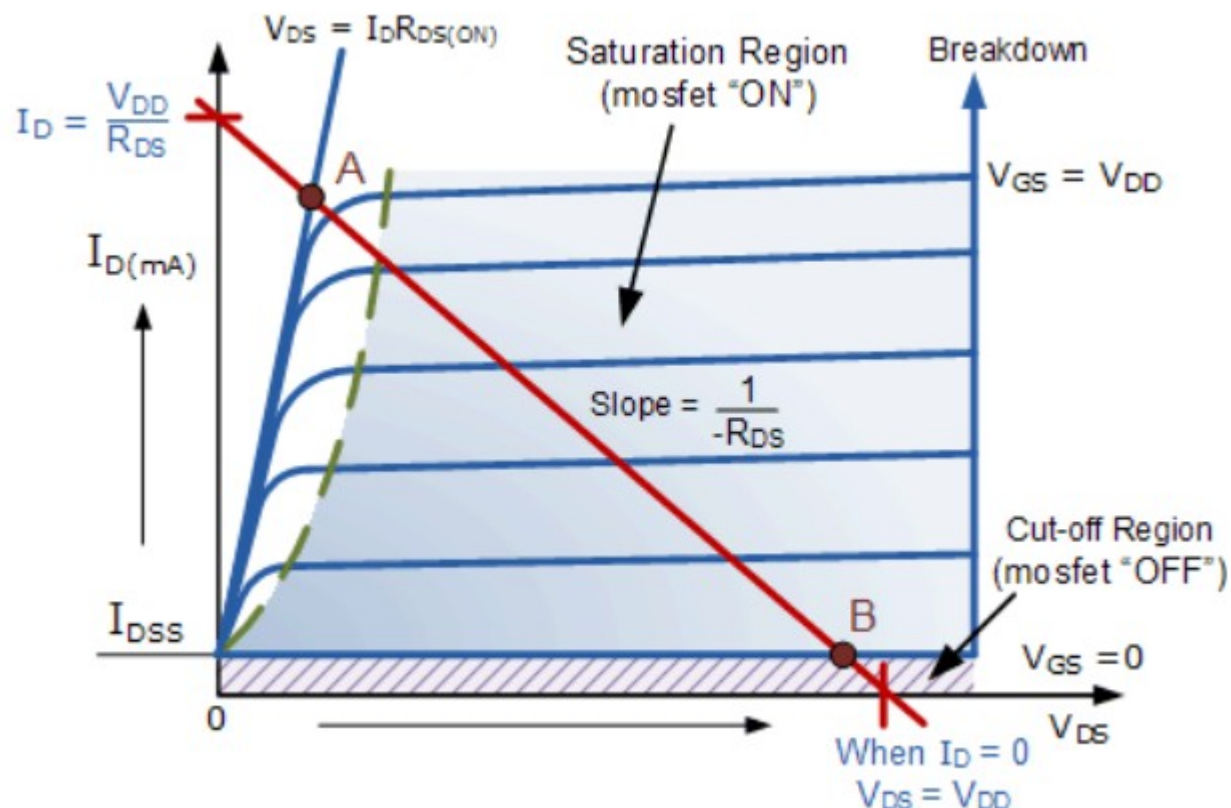
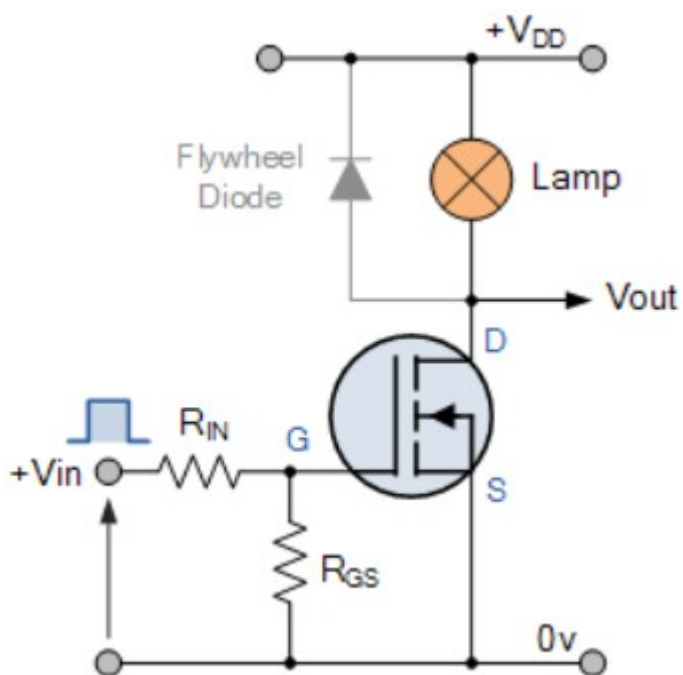


3,3 V-os jelszinttel csak kis (5 – 20 mA) kapcsolható!

9 – 10 V-os bemenőjel esetén minimális a maradékfeszültség ($U_{GS} < 1 \text{ V}$)

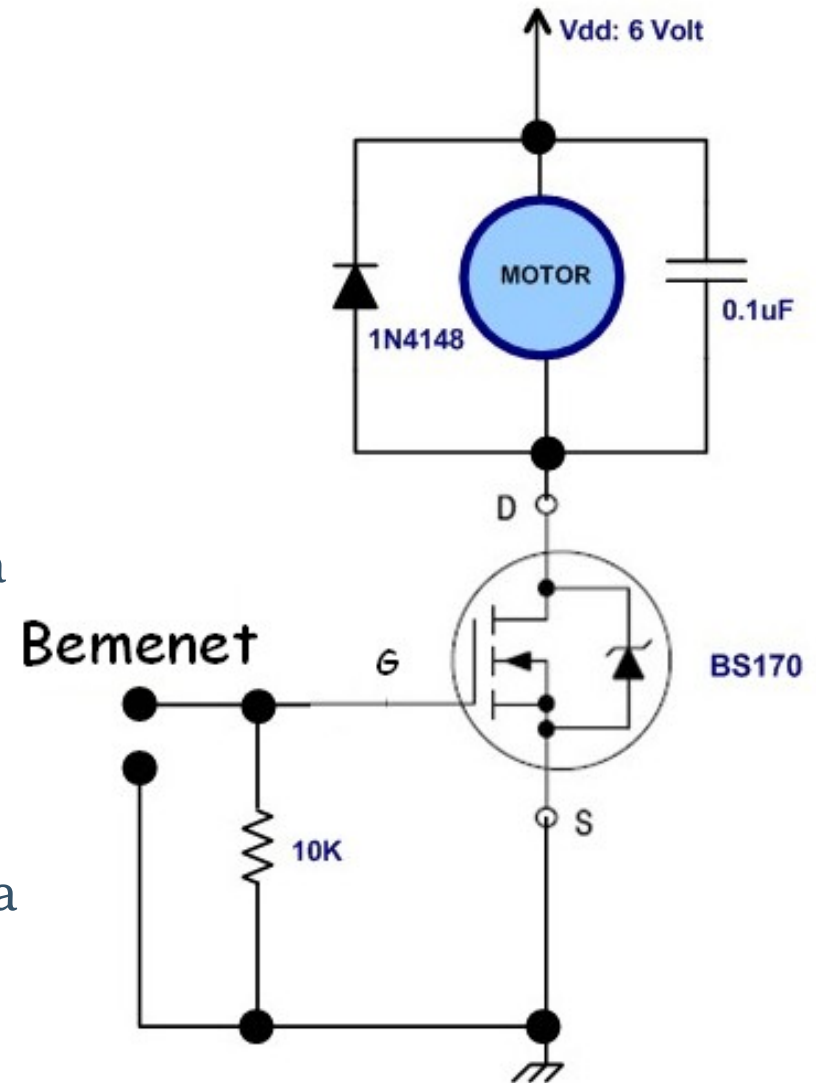
A MOSFET mint kapcsoló

- Ha V_{in} nulla körüli alacsony feszültség, akkor a tranzisztor nem vezet, az **S** forrás és a **D** nyelő között közelítőleg a tápfeszültség mérhető (**B**)
- Ha a kapu (**G**) elektródájára pozitív feszültséget kapcsolunk, a tranzisztor vezet, a forrás (**S**) és nyelő (**D**) elektródák közt csak 100 mV nagyságrendű maradékfeszültség mérhető (**A**)

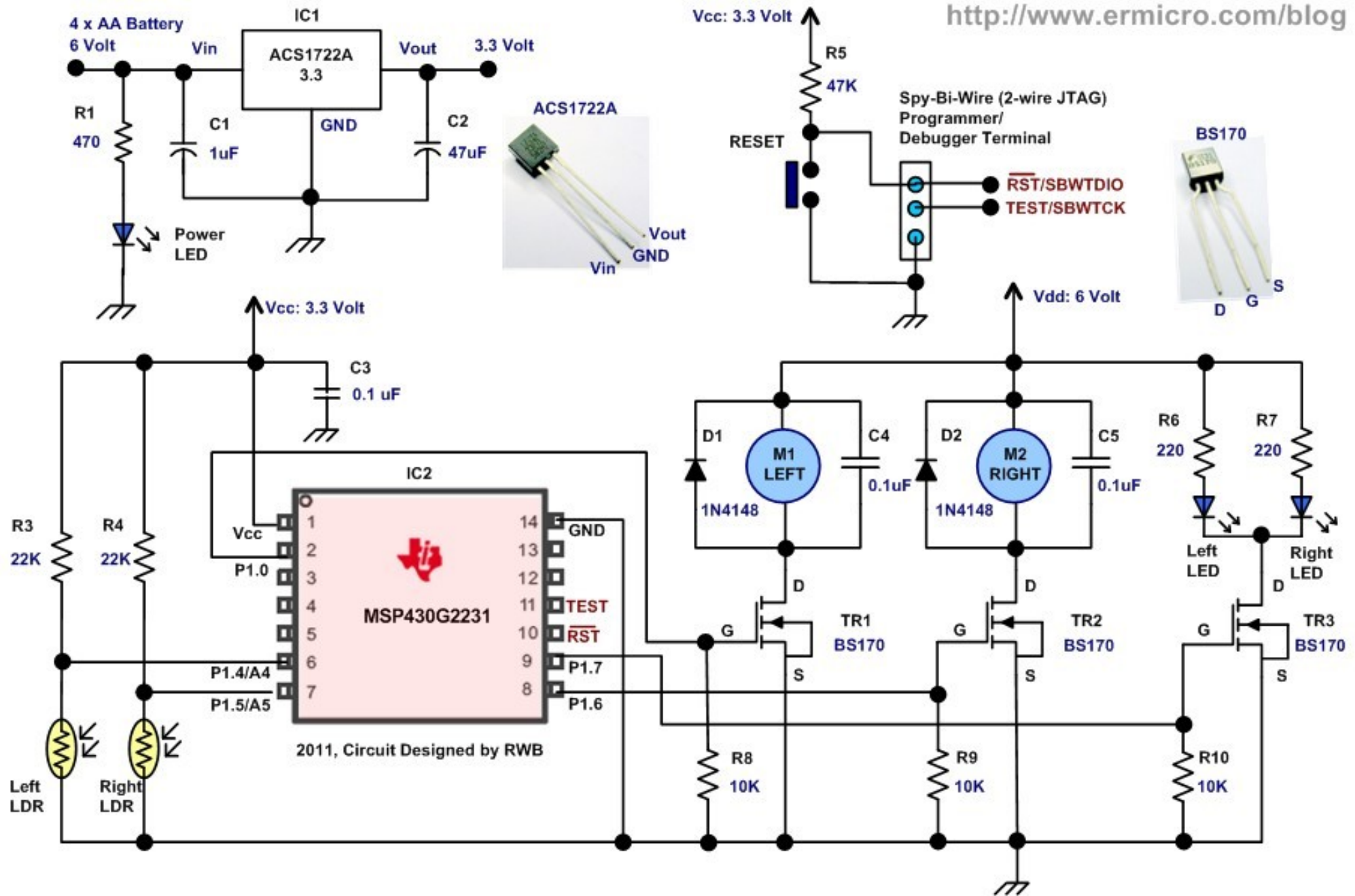


A MOSFET mint kapcsoló

- Az alábbi n-csatornás MOSFET kapcsolás a földelt emitteres NPN tranzisztoros kapcsoláshoz hasonlít
 - ❖ Feszültségvezérlés miatt nem kell soros ellenállás a bemenetre
 - ❖ A Gate és a föld közé kötött ellenállás megakadályozza, hogy a lebegő bemenet esetleges feltöltődése kinyissa a tranzisztort
 - ❖ Az 1N4148 dióda az induktív terhelés miatt szükséges védelem.
 - ❖ A kondenzátor a kefék motor szikrázása miatti zavarokat szűri



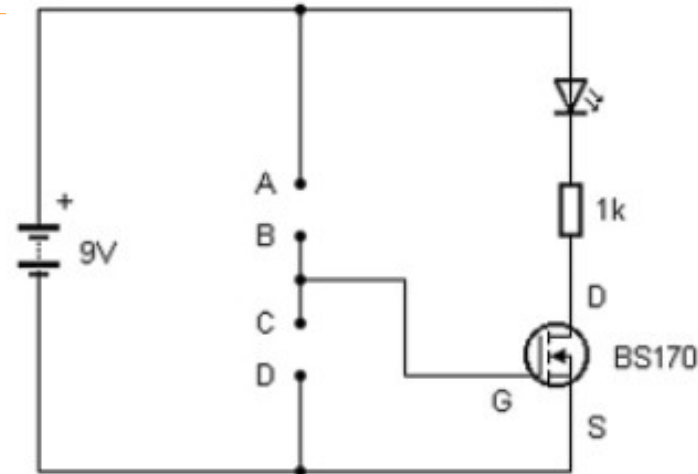
FET alkalmazási példa: Vonalkövető robot kapcsolóelemeiként (motorok, LED-ek vezérlése)



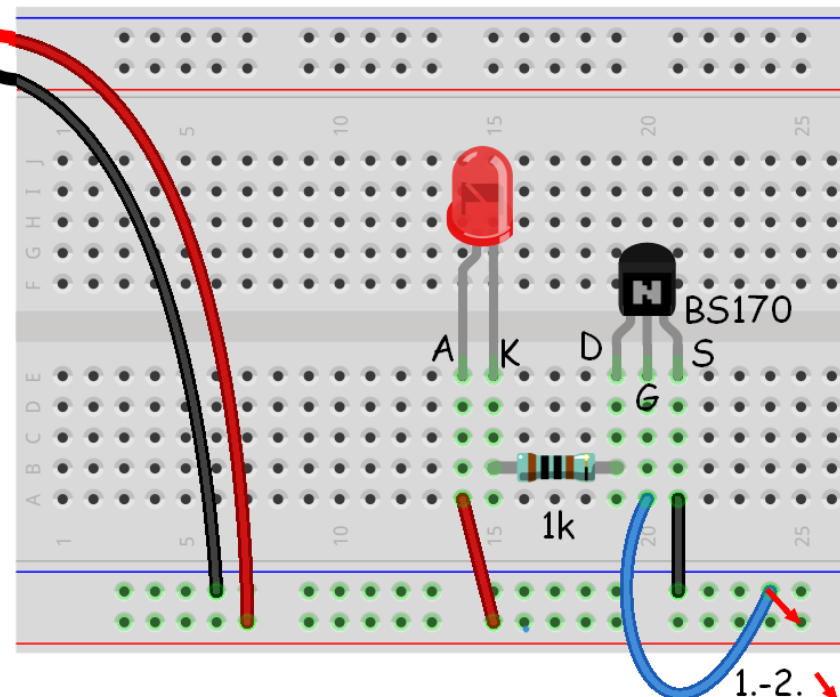
<http://www.ermicro.com/blog>

Egyszerű FET-es kapcsolás

A MOSFET vezérelt árama (D-S között) a G és S közé kapcsolt feszültségtől függ. Ha G-re legalább kb. 2V pozitív feszültség jut, a tranzisztor vezet. A G kivezetés teljesen szigetelt, és egy kis, kb. 60 pF-os kondenzátort képez. Ezért, ha a Gate egyszer fel lett töltve, a Gate-feszültség sokáig fennmarad.



- 1. feladat:** Építsük meg a kapcsolást, majd az **A-B** pontok zárásával töltsük fel a G elektródát!
- 2. feladat:** A **C-D** pontok zárásával süssük ki a G elektródát!



Forrás: Conrad Elektronikai kísérletezőkészlet mintapéldája, 15. MOSFET-es érintés érzékelő

Figyelem: Vigyázzunk a Gate bemenetre, ami különösen érzékeny a statikus töltésekre!

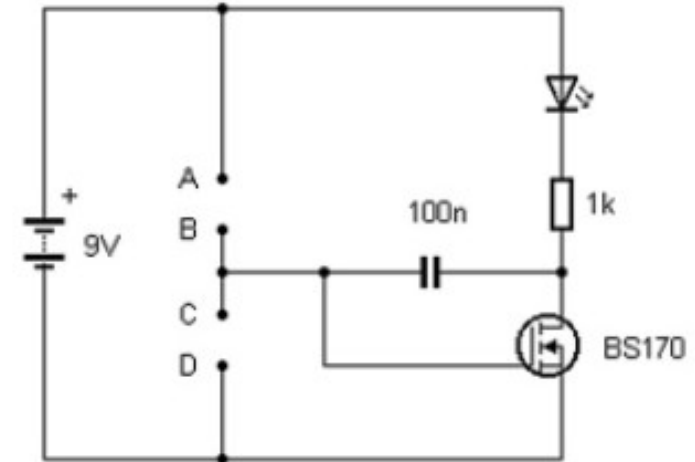
LED fényerejének változtatása

Ha beiktatunk egy kondenzátort a Gate és Drain közé, a „teljesen be“ és „teljesen ki“ közötti állapotok is fennmaradhatnak. Ha a Gate feszültség csökken, a Drain-áram kisebb lesz, a LED fényereje csökken.

- Az A és B kontaktusok érintésekor a LED fényesebben világít.
- A C és D-t kontaktusok érintésekor a LED elhalványodik.

Megjegyzés: Az érintésre adott válasz sebessége különböző. A fényerő növekedés a nagyobb töltőfeszültség miatt gyorsabb, mint az elhalványodás.

Forrás: Conrad Elektronikai kísérletezőkészlet mintapéldája, 15. Érintésérzékelő dimmer

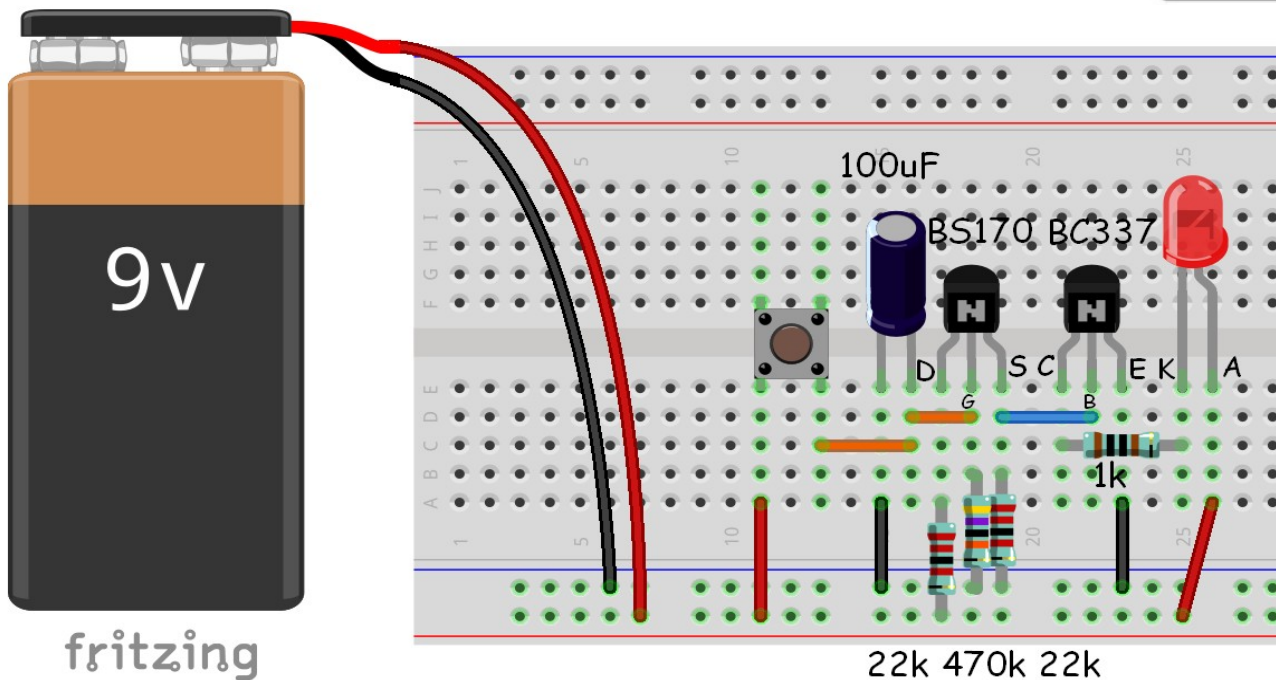
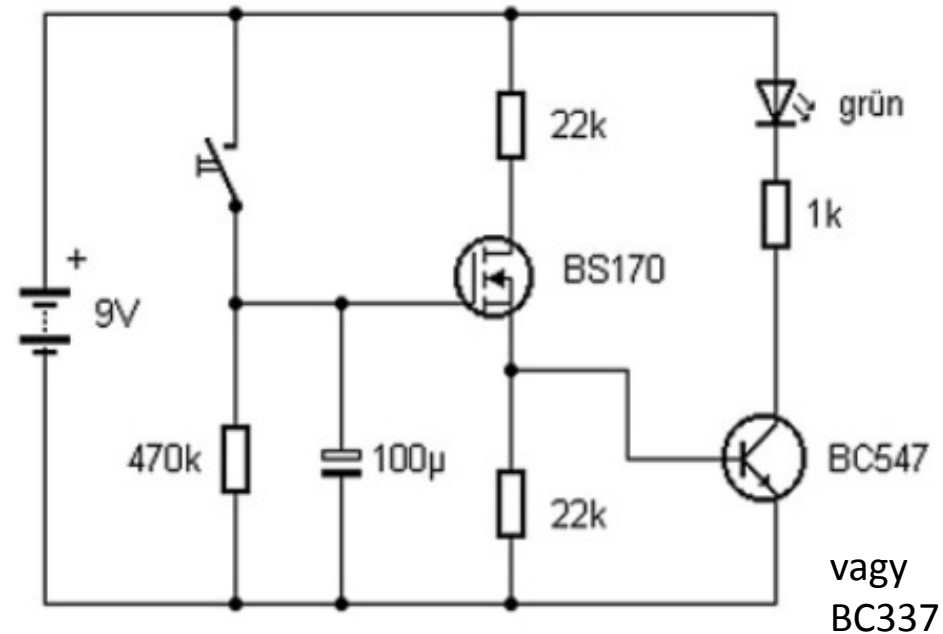


3. feladat: Az 1. feladatnál megépített áramkört egészítsük ki egy kondenzátorral a fenti ábrán látható módon! Vizsgáljuk meg az áramkör működését!

Figyelem: Vigyázzunk a Gate bemenetre, ami különösen érzékeny a statikus töltésekre!

Egyperces időzítő

A nyomógomb megnyomásakor a LED bekapcsol, és körülbelül egy percig világít. Az átmenet a be- és kikapcsolás között lágy, de viszonylag gyors. A kondenzátor 9 V-ra töltődik fel. Kisülni a 470-k Ω -os ellenálláson keresztül fog. Amíg a Gate feszültség kb. 2,6 V fölött van, a FET vezet, és bázisárammal látja el az NPN tranzisztort, amely a LED-et bekapcsolja.



Forrás: Conrad Elektronikai kísérletezőkészlet mintapéldája, 20. Egyperces világítás

Három LED-es villogó

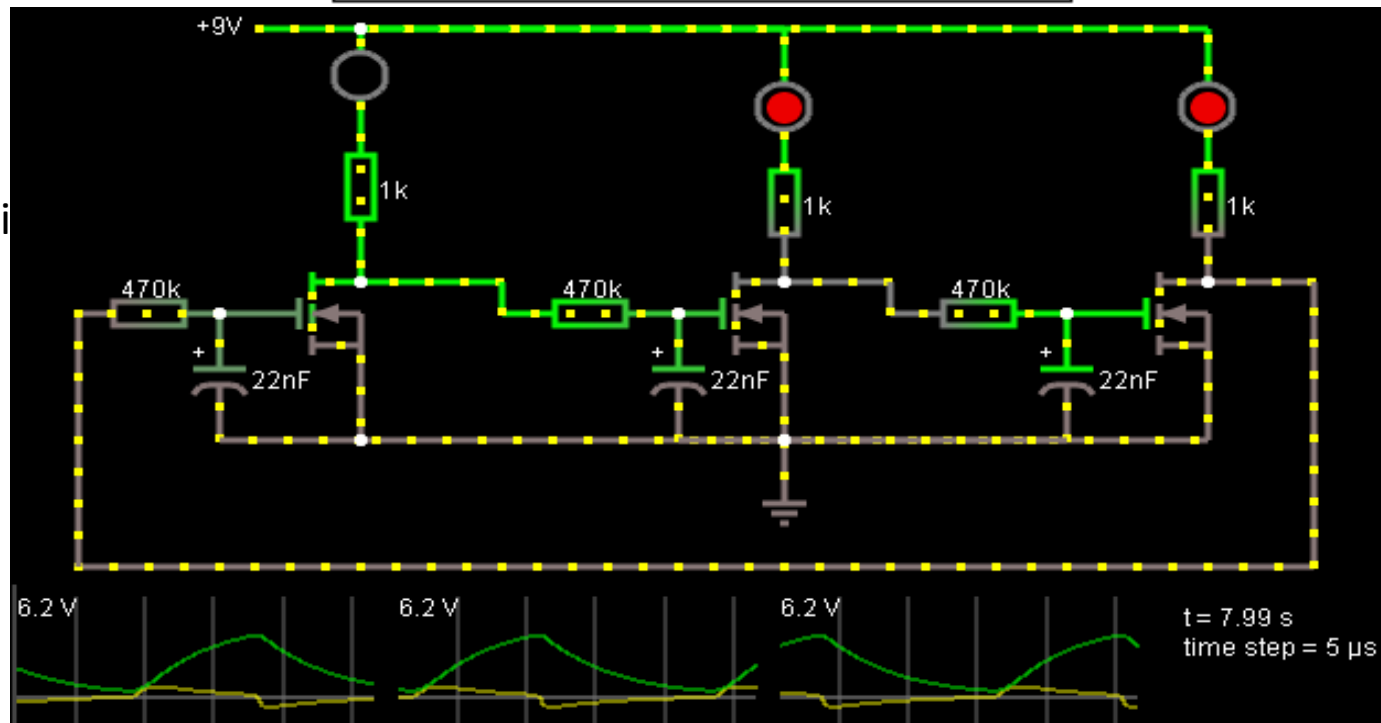
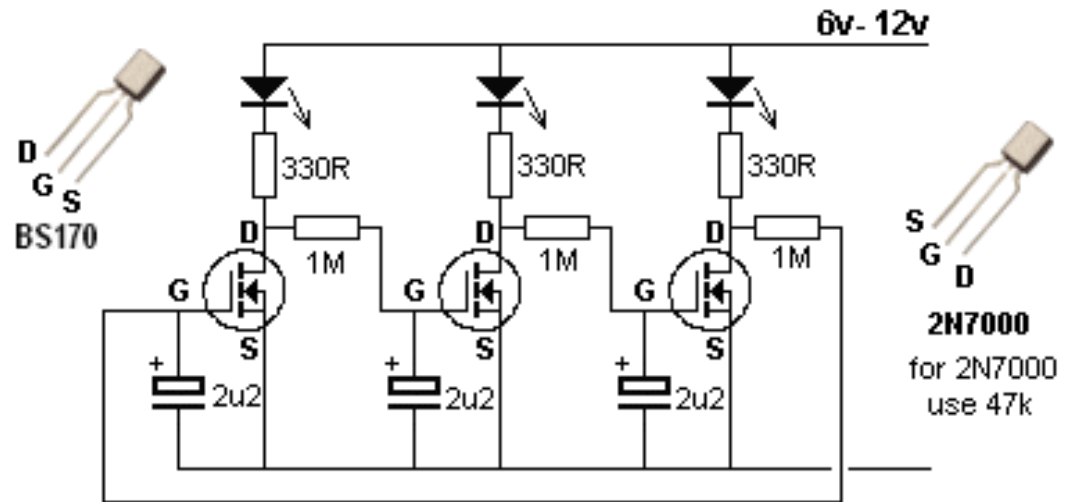
Forrás: www.talkingelectronics.com/projects/MOSFET/MOSFET.html

Mindhárom FET bemenete töltési és kisütési fázisokon megy keresztül, de fáziseltolással.

Végeredményben a három LED közül valamelyik mindig kikapcsolt állapotban van, kettő pedig világít.

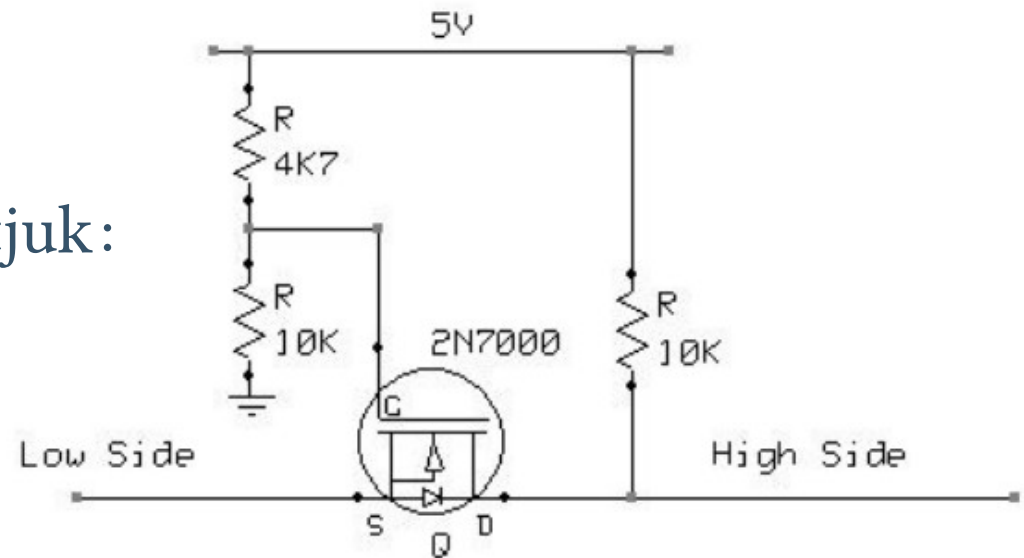
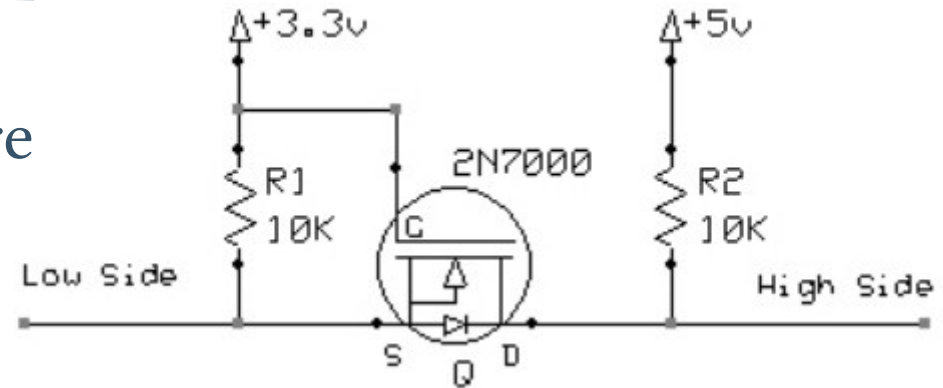
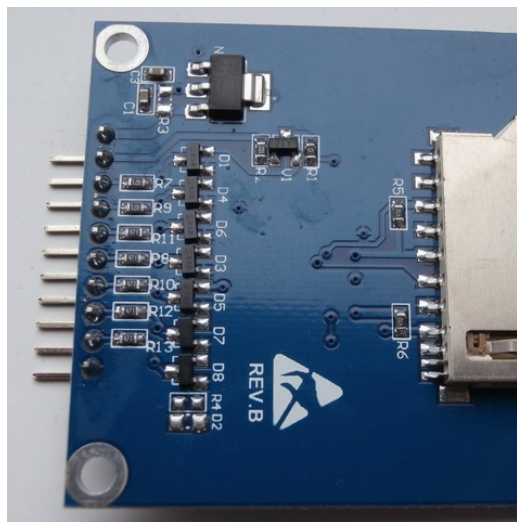
Az áramkört a szimulátorban is kipróbálhatjuk. A szimulációhoz az időállandót a századrészére csökkentettük, hogy a jelalak áttekinthető legyen.

Szimulátor:
www.falstad.com/circuit/



Jelszint illesztés FET-tel

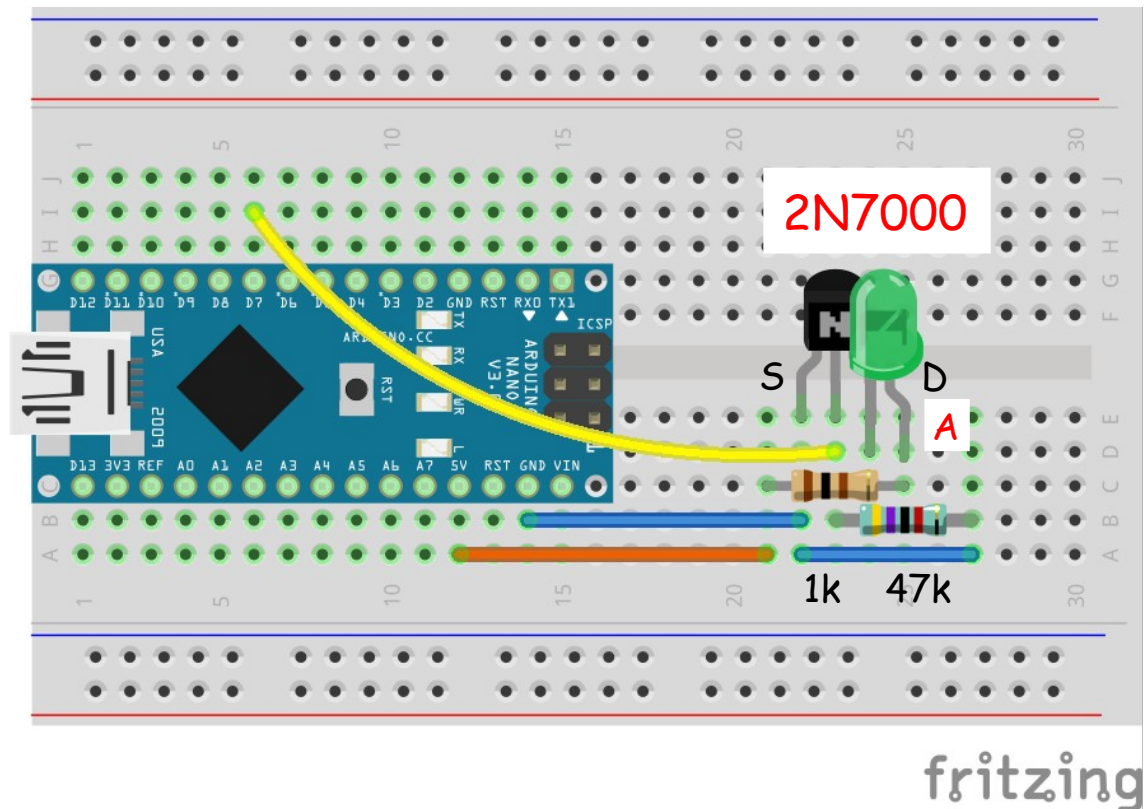
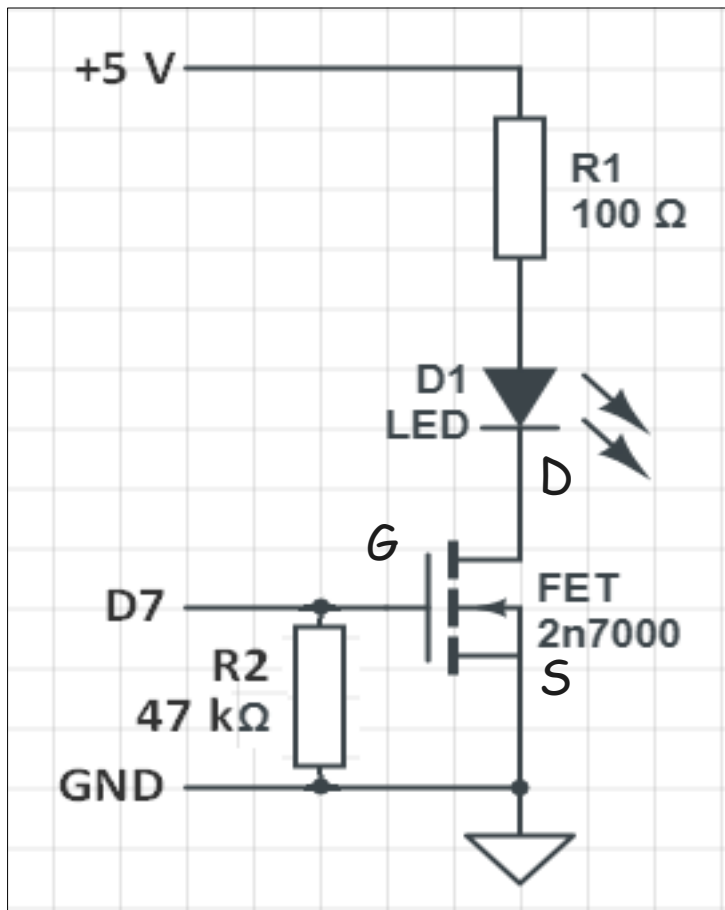
- Arduino, vagy más, 5 V-os eszköz és 3.3 V-tal működő eszközök összekapcsoláskor szintillesztésre van szükség. Ennek egyik megoldása lehet az alábbi FET kapcsolás, amely kétirányú szintillesztésre is alkalmas
- Ha a FET környezetében nincs 3.3V, akkor az 5V-ot is leoszthatjuk:



← Példa: Arduinohoz illesztett TFT kijelző hátlapja

LED kapcsolgatása FET-tel

- Kapcsolgassunk egy LED-et 2N7000 típusú n-csatornás FET-tel!
- A FET G elektródáját a D7 digitális kimenetre kötöttük
- Ne feledkezzünk meg a LED áramkorlátozásáról (R1) !



fet_ledblink.ino

- Vegyük észre, hogy ez a program semmiben sem különbözik attól, mintha a kimenetről közvetlenül táplálnánk a LED-et!
- A különbség a hardverben (a kapcsolásban) van: az Arduino digitális kimenetét nem terheljük meg a LED áramával, tehát akár nagyobb teljesítményű vagy feszültségű fogyasztót is vezérelhetnénk

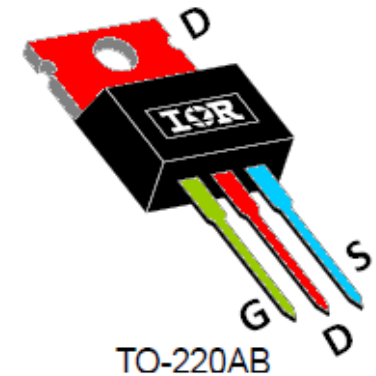
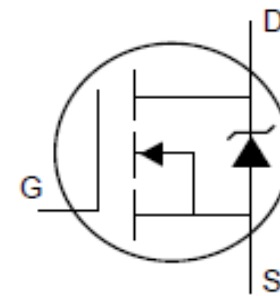
```
#define GREEN_LED 7

void setup() {
  pinMode(GREEN_LED,OUTPUT);    // D7 legyen kimenet
}

void loop() {
  digitalWrite(GREEN_LED,HIGH); // GREEN_LED világít
  delay(1000);                  // 1 s várakozás
  digitalWrite(GREEN_LED,LOW);  // GREEN_LED nem világít
  delay(1000);                  // 1 s várakozás
}
```

IRLZ44N power FET

- Nagyteljesítményű: 55 V, 47 A HEXFET, n-csatornás, növekményes
- Kis maradékellenállású: $R_{DS(on)} = 0.022 \Omega$
- Kis nyitófeszültségű („logikai” FET): 4-5 V
- TO-220 tokozású (hűthető)
- Gyártó: **International Rectifier**

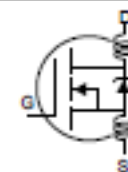


Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	47	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	33	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	110	W
	Linear Derating Factor	0.71	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 16	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	210	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	25	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	11	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lbf·in (1.1N·m)	

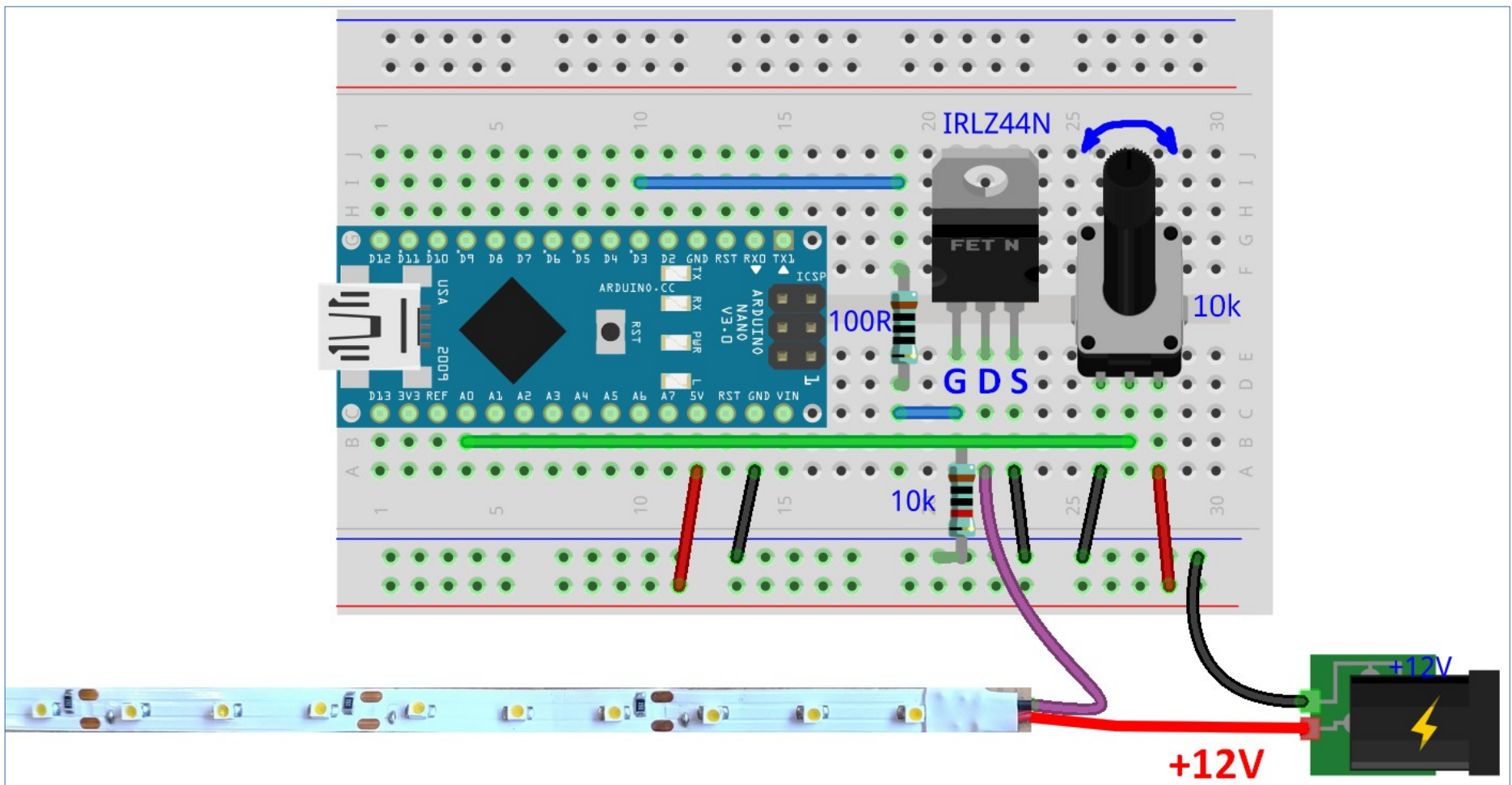
Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.070	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.022	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ④
		—	—	0.025		$V_{GS} = 5.0V, I_D = 25A$ ④
		—	—	0.035		$V_{GS} = 4.0V, I_D = 21A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	1.0	—	2.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	21	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 16V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -16V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	48	nC	$I_D = 25A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	8.6		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	25		$V_{GS} = 5.0V$, See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	11	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	84	—		$I_D = 25A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	26	—		$R_G = 3.4\Omega, V_{GS} = 5.0V$
t_f	Fall Time	—	15	—		$R_D = 1.1\Omega$, See Fig. 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1700	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	400	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	150	—		$f = 1.0MHz$, See Fig. 5



Kapcsolási elrendezés

- A LED szalagot egy 12 V-os külső tápegységről járattjuk, s ez az áramkör az **IRLZ44** FET-en, mint kapcsolón keresztül zárul
- A Gate elektródát az Arduino **D3** kimenete vezérli PWM módban



fet_pwm.ino

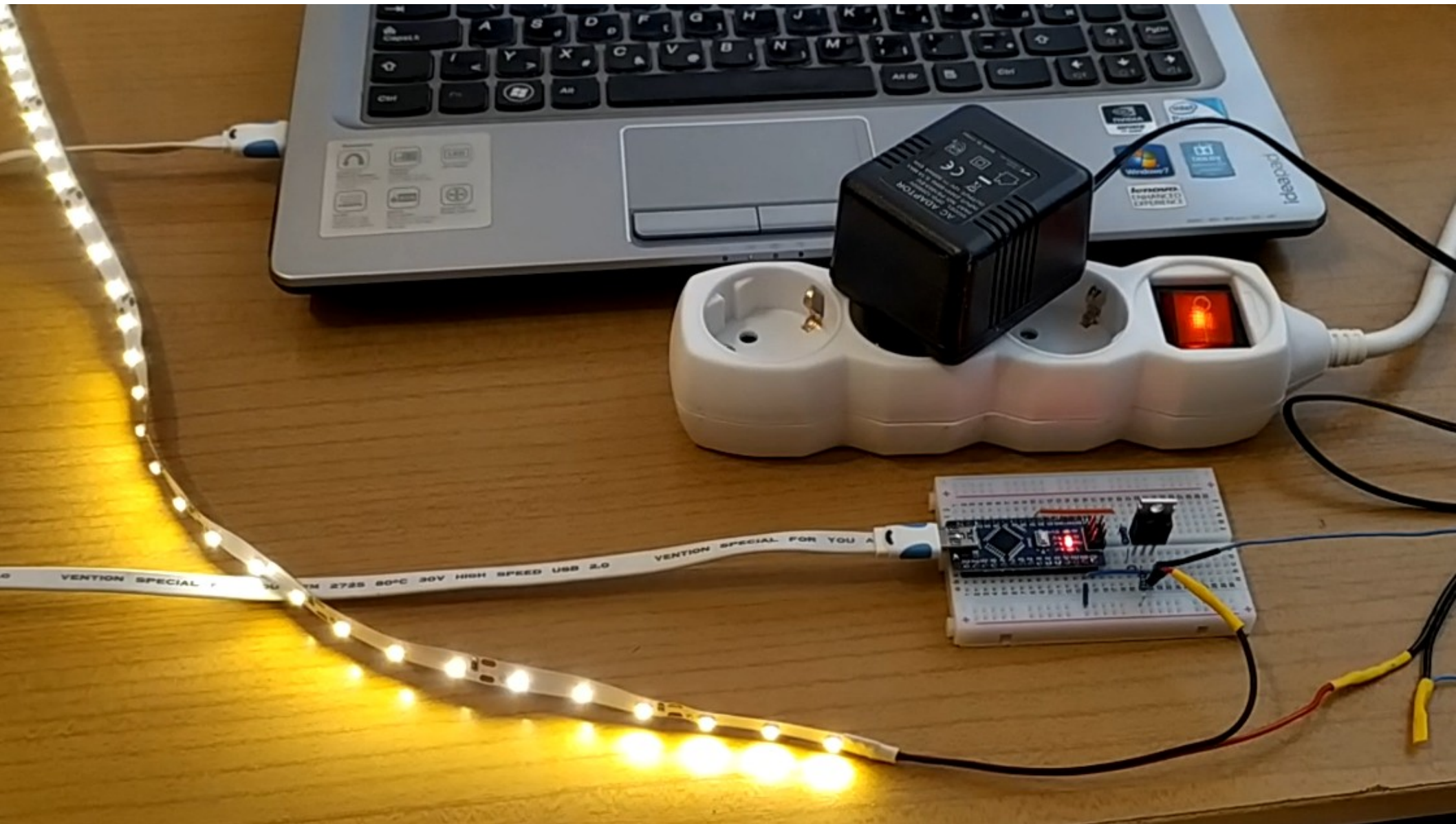
- Az `arduino19_05` előadás `led_fade_exp.ino` mintaprogramját vettük elő, s itt csak a kivezetés sorszámán változtattunk

```
#define led      3           // D3-ra van kötve a LED szalagot vezérlő FET
uint16_t idx = 0;         // Index a kitöltési tényezők számításához
uint16_t next_sqr = 1;   // A következő négyzetszám
uint16_t sqr_step = 3;   // Új növekmény a négyzetszámok kiszámításához
void setup() {
    pinMode(led, OUTPUT); // D5 legyen kimenet (ez a sor elhagyható)
}

void loop() {
    analogWrite(led, next_sqr>>4);
    idx++; // A futó index növelése
    if (idx < 63) { // Az első 63 lépésben felfelé lépünk
        next_sqr += sqr_step;
        sqr_step += 2;
    } else if (idx < 125) { // A második 63 lépésben lefelé lépünk
        sqr_step -= 2;
        next_sqr -= sqr_step;
    } else idx = 0; // Új periódus kezdődik
    delay(25);
}
```

fet_pwm.ino

- A kapcsolási elrendezés és az eredmény az alábbi képen látható



fet_pwm_control.ino

- A kapcsolást egy potméterrel kiegészítve, az **A0** bemeneten mért feszültséggel vezéreljük a LED szalag teljesítményét, négyzetes összefüggés alapján ($P \propto V_{in}^2$)

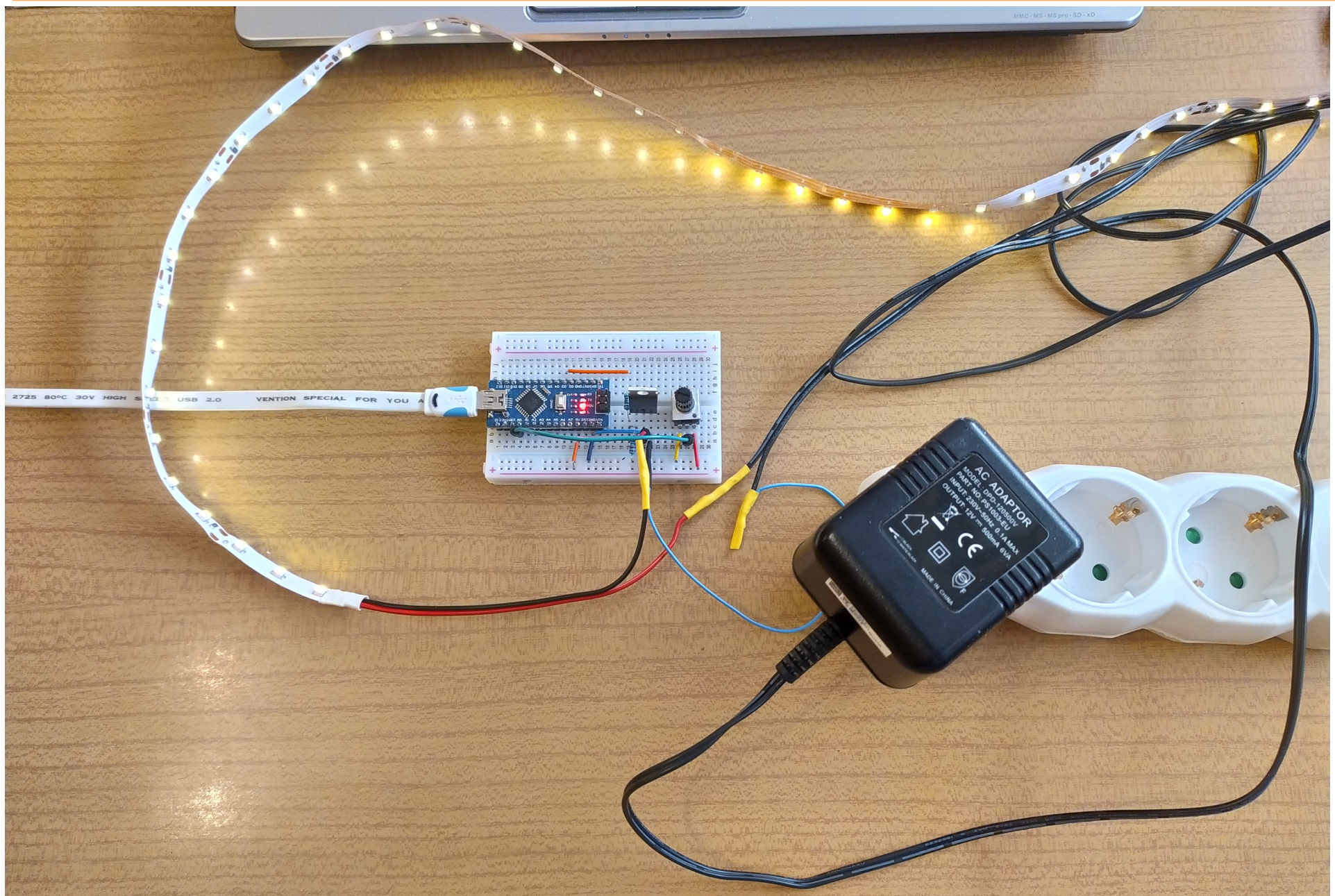
```
#define led    3 // D3-ra van kötve a FET
void setup() {
  analogReference(DEFAULT); // VCC legyen a referencia
}

void loop() {
  long a = meres(A0, 500); // 500 mérés átlagolással
  int duty = map(a*a,0,1046529,0,255); // a*a-t átskálázzuk 0-255 közé
  analogWrite(led, duty); // de (a*a)>>12 is megfelelne
  delay(50);
}

int meres(int pin, int n) {
  long sum=0;
  for(int i=0; i<n; i++) {
    sum += analogRead(pin);
  }
  return sum/n;
}
```

Ezt a függvényt az előző előadásban már használtuk több mérés eredményének átlagolására

fet_pwm_control.ino futási eredménye

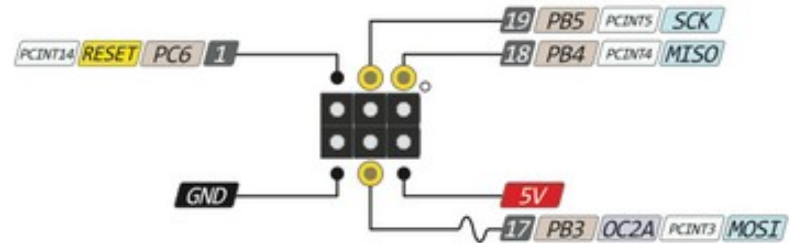


Az Arduino nano kártya kivezetései



NANO PINOUT

The power sum for each pin's group should not exceed 100mA

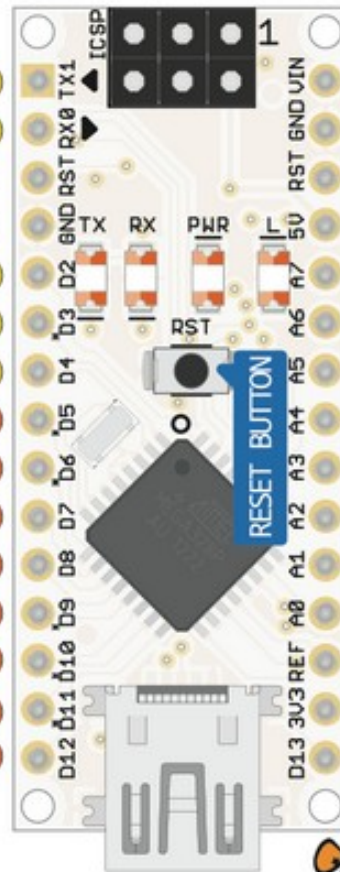


1
0

PCINT17 TXD PD1 31
PCINT16 RXD PD0 30
PCINT14 RESET PC6 29
GND

2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

PCINT18 INT0 PD2 32
OC2B PCINT19 INT1 PD3 1
XCK PCINT20 T0 PD4 2
OC0B PCINT21 T1 PD5 9
OC0A PCINT22 AIN0 PD6 10
PCINT23 AIN1 PD7 11
ICP1 PCINT0 CLKO PB0 12
PCINT1 OC1A PB1 13
SS PCINT2 OC1B PB2 14
MOSI PCINT3 OC2 PB3 15
MISO PCINT4 PB4 16



VIN
GND
29 PC6 RESET PCINT14
5V
22 ADC7
19 ADC6
28 PC5 PCINT13 ADC5 SCL
27 PC4 PCINT12 ADC4 SDA
26 PC3 PCINT11 ADC3
25 PC2 PCINT10 ADC2
24 PC1 PCINT9 ADC1
23 PC0 PCINT8 ADC0
21 AREF
3V3
17 PB5 PCINT5 SCK

A7
A6
19 A5
18 A4
17 A3
16 A2
15 A1
14 A0

- Power
- GND
- Serial Pin
- Analog Pin
- Control
- INT
- Physical Pin
- Port Pin
- Pin function
- Interrupt Pin
- PWM Pin
- Port Power

Absolute MAX per pin 40mA recommended 20mA

Absolute MAX 200mA for entire package

Analog exclusively Pins

Ellenállás színkódok

