

# ADVANCED ELEKTRONIKA

*Alkatrészek, analóg és teljesítményelektronika, szűrők, PCB és USB-PD  
esettanulmány*

**Mire való ez a jegyzet?**

Gyakorlati, vizsgára és tervezési gondolkodásra épülő összefoglaló. A cél nem az, hogy minden képletet bemagolj, hanem hogy felismerd: melyik alkatrész mit csinál, melyik nemideális tulajdonság válik fontossá nagy frekvencián, és miért nem azonos a kapcsolási rajz a működő nyákkal.

**Tartalom**

- Jelölések és alapfogalmak
- Passzív alkatrészek: R, C, L, varisztor
- Rezgőkörök, LCR és szűrők
- Diódák és tranzisztorok: BJT, MOSFET, IGBT, GaN
- Műveleti erősítő és NE555
- Erősítőosztályok A, B, AB és D
- Kapcsolóüzemű tápegységek alapjai
- PCB-tervezés: paraziták, hurkok, visszavezetési utak, EMI
- USB-C PD + GaN 65 W töltő esettanulmány
- Hibakeresés, mérési tippek és vizsgakérdések

Biztonság: hálózati és nagyfeszültségű kapcsolóüzemű tápegységek életveszélyes feszültségeket tartalmazhatnak. A jegyzet elméleti/oktatási célú; hálózati prototípuson csak megfelelő leválasztással, mérőeszközzel és biztonsági gyakorlattal dolgozz.

## 1. Jelölések és alapfogalmak

| Jel            | Mennyiség            | Egység / megjegyzés          |
|----------------|----------------------|------------------------------|
| U vagy V       | feszültség           | V                            |
| I              | áram                 | A                            |
| R              | ellenállás           | $\Omega$                     |
| C              | kapacitás            | F                            |
| L              | induktivitás         | H                            |
| P              | teljesítmény         | W                            |
| E              | energia              | J, Wh                        |
| f              | frekvencia           | Hz                           |
| $\omega$       | körfrekvencia        | rad/s; $\omega=2\pi f$       |
| Z              | impedancia           | $\Omega$ , komplex mennyiség |
| X <sub>C</sub> | kapacitív reaktancia | $X_C=1/(2\pi fC)$            |
| X <sub>L</sub> | induktív reaktancia  | $X_L=2\pi fL$                |

### DC és AC gondolkodás

DC-ben sokszor elegendő az Ohm-törvény és a teljesítmény:  $U=RI$ ,  $P=UI=I^2R=U^2/R$ . AC-ben az alkatrészek fázistolást és frekvenciafüggő impedanciát okoznak. A kondenzátor egyre kisebb, a tekercs egyre nagyobb reaktanciát mutat a frekvencia növekedésével.

#### A fontos váltás

Alacsony frekvencián egy vezeték 'csak vezeték'. Gyors élű digitális vagy kapcsolóüzemű áramkörben ugyanaz a vezeték ellenállás, induktivitás, kapacitás és akár távvezeték is.

### Időállandó

RC:  $\tau=RC$ . RL:  $\tau=L/R$ . Egy elsőrendű rendszer kb.  $1\tau$  alatt 63%-ra,  $5\tau$  alatt gyakorlatilag végtértekre jut.

## 2. Passzív alkatrészek - nem csak az érték számít

### Ellenállás

Az ellenállás áramot korlátoz, feszültséget oszt, munkapontot állít és energiát disszipál. Valós ellenállásnál számít a névleges teljesítmény, tolerancia, hőfoktényező, maximális feszültség és nagy frekvencián a parazita L/C.

### Varisztor (MOV)

Feszültségfüggő ellenállás, amely normál üzemben nagy ellenállású, túlfeszültségnél erősen vezetni kezd és energiát nyel el. Hálózati tranziensvédelemben gyakori, de öregszik: sok vagy nagy impulzus után a karakterisztikája romolhat. Biztosítóval és megfelelő túlfeszültségi koncepcióval együtt értelmezendő.

### Kondenzátortípusok

| Típus           | Erősség                           | Gyengeség                           | Tipikus használat                     |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| C0G/NP0 kerámia | nagyon stabil, alacsony veszteség | kis kapacitás                       | RF, időzítés, rezonancia              |
| X7R/X5R MLCC    | kicsi, olcsó, nagy C              | DC-bias miatt C csökken; piezohatás | decoupling, általános                 |
| Al-elektrolit   | nagy C, olcsó                     | polarizált, ESR, élettartam         | puffer, alacsony frekvencia           |
| Polimer         | alacsony ESR, jó ripple           | drágább, feszültségtartomány        | DC/DC kimenet                         |
| Fólia           | stabil, jó impulzus és AC         | nagyobb méret                       | snubber, audio, rezonáns kör          |
| Tantál          | jó C/térfogat                     | túláram/túlfesz érzékeny            | stabil tápágak, megfelelő deratinggel |

#### MLCC csapda

Egy 10  $\mu$ F-os X5R/X7R kondenzátor a névleges DC feszültség közelében ténylegesen jóval kisebb kapacitású lehet. A kapcsolás szimulációja gyakran a névleges 10  $\mu$ F-fal számol, a valós panel viszont nem.

### Tekercsek

A tekercs energiát tárol a mágneses térben:  $E = \frac{1}{2}LI^2$ . Valós paraméterei: induktivitás, DC ellenállás (DCR), telítési áram, RMS áram, magvesztesség, önrezonancia és parazita kapacitás. Kapcsolóüzemű tápban a '10  $\mu$ H' önmagában kevés specifikáció.

### 3. Rezgőkörök, LCR és szűrők

#### LC rezonancia

Ideális LC kör sajátfrekvenciája:  $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ . Az energia felváltva tárolódik a kondenzátor elektromos és a tekercs mágneses terében. Valós körben R veszteség miatt a rezgés csillapodik.

Minőségi tényező Q: a rezonancia 'élességének' mértéke. Nagy Q keskeny sávot és erős rezonanciát jelent, de a pontos képlet a soros/párhuzamos topológiától függ.

#### Elsőrendű RC szűrők

Határfrekvencia:  $f_c = 1/(2\pi RC)$ . Aluláteresztőnél a magas frekvenciák csillapodnak; felüláteresztőnél az alacsonyok. Egyetlen pólus ideálisan kb. 20 dB/dekád meredekséget ad.

#### RLC / LCR szűrők

| Szűrő                                                                                                                                                                                                                            | Mit enged át?                        | Hol használjuk?                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Low-pass                                                                                                                                                                                                                         | alacsony f                           | tápzaj, PWM kisimítás, anti-alias |
| High-pass                                                                                                                                                                                                                        | magas f                              | DC leválasztás, AC csatolás       |
| Band-pass                                                                                                                                                                                                                        | egy frekvenciasáv                    | rádió, érzékelő, IF               |
| Notch / band-stop                                                                                                                                                                                                                | egy sávot elnyom                     | 50/60 Hz brumm, zavar             |
| LC / $\pi$ szűrő                                                                                                                                                                                                                 | nagyobb meredekség, kis DC veszteség | SMPS bemenet/kimenet, EMI         |
| <b>Miért 'csak elméleti' az egyszerű szűrő?</b>                                                                                                                                                                                  |                                      |                                   |
| Mert a forrás impedanciája, terhelés, ESR/ESL, tekercs DCR és önrezonancia, nyák parazitái és a komponensek toleranciája mind módosítják a pólusokat és nullhelyeket. Egy LC szűrő ráadásul csillapítás nélkül be is rezonálhat. |                                      |                                   |

#### Példa

$R=1\text{ k}\Omega$  és  $C=100\text{ nF}$  esetén  $f_c \approx 1/(2\pi \cdot 1000 \cdot 100\text{ nF}) \approx 1,59\text{ kHz}$ . Ha a következő fokozat bemeneti ellenállása csak  $1\text{ k}\Omega$ , már nem ugyanaz a szűrő: a terhelés átírja az effektív R-t.

## 4. Félvezetők és tranzistorcsaládok

### BJT - NPN és PNP

A BJT áramvezérelt szemlélettel tanulható: kis bázisáram nagyobb kollektoráramot vezérel. NPN-nél a tipikus low-side kapcsolásban az emitter a negatív sín felé van; PNP gyakran high-side vagy komplementer fokozatban jelenik meg.

Aktív tartományban közelítőleg  $I_C \approx \beta I_B$ , de kapcsolóként telítésbe hajtjuk. A  $\beta$  nem stabil tervezési konstans: példány-, áram- és hőmérsékletfüggő.

### FET / MOSFET

Feszültségvezérelt eszköz. A gate DC-ben nagyon kis áramot vesz fel, de kapacitív: kapcsoláskor gate-töltést kell mozgatni. Teljesítmény-MOSFET-nél fontos  $R_{DS(on)}$ ,  $Q_g$ ,  $C_{oss}$ ,  $V_{DS}$ , SOA és a body-dióda.

### IGBT

MOS-gate vezérlésű, bipoláris vezetési tulajdonságú teljesítményeszköz. Nagy feszültség/nagy teljesítmény tartományban kedvező lehet, de kikapcsolási 'tail current' miatt általában lassabb, mint a MOSFET. Motorhajtás, inverter, ipari teljesítményelektronika tipikus terület.

### GaN HEMT

Széles tiltott sávú teljesítményfélvezető. Nagyon gyors kapcsolás, kis kapcsolási veszteség és kis töltések teszik vonzóvá magas frekvencián; ez kisebb mágneses alkatrészeket és nagyobb teljesítménysűrűséget tehet lehetővé. Cserébe a layout, gate-hurok,  $dv/dt$  és EMI sokkal kritikusabb.

| Eszköz    | Vezérlés               | Erősség                         | Tipikus tartomány                        |
|-----------|------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|
| BJT       | bázisáram              | egyszerű analóg, jó linearitás  | kis/közepes teljesítmény                 |
| Si MOSFET | gate feszültség/töltés | gyors, kis $R_{DS(on)}$         | alacsony-közepes/nagy V                  |
| IGBT      | gate                   | nagy V és P                     | inverter, motor, ipar                    |
| GaN       | gate, nagyon gyors     | nagy f, kis veszteség, sűrű táp | adapter, PFC, DC/DC, RF bizonyos típusok |

## 5. Műveleti erősítő és NE555

### Műveleti erősítő

Az op-amp a két bemenet különbségét erősíti:  $V_{out} = A_{OL}(V_+ - V_-)$ , de nyílt hurkú erősítése nagyon nagy, ezért szinte mindig negatív visszacsatolással használjuk.

Ideális közelítés negatív visszacsatolásban: bemeneti áram  $\approx 0$ ,  $V_+ \approx V_-$ . Valóságban számít a bemeneti offset, bias áram, GBW, slew rate, kimeneti áram, zaj, common-mode tartomány és rail-to-rail képesség.

| Kapcsolás        | Közelítő erősítés                                       |
|------------------|---------------------------------------------------------|
| Invertáló        | $A_v = -R_f/R_{in}$                                     |
| Nem invertáló    | $A_v = 1 + R_f/R_g$                                     |
| Feszültségkövető | $A_v \approx 1$                                         |
| Összegző         | több bemenet súlyozott összege                          |
| Komparátor?      | op-amp használható, de dedikált komparátor sokszor jobb |

### NE555

Klasszikus időzítő IC belső komparátorokkal, RS tárolóval és kisütő tranzisztorral. A küszöbök hagyományosan a táp kb. 1/3 és 2/3 részéhez kötődnek.

#### Monostabil

Trigger után egy meghatározott idejű impulzust ad. Közelítő impulzushossz:  $t \approx 1,1RC$ .

#### Asztabil multivibrátor

Folyamatos négyszögjelet generál. Klasszikus kapcsolásban  $f \approx 1,44/((R_A + 2R_B)C)$ .

#### Bistabil

Két stabil állapot; set/reset jellegű tárolóként használható.

#### 555 gyakorlati csapda

A nagy áramú, gyors kimeneti élek tápzajt okoznak. Tegyéél közeli 100 nF decouplingot, rövid visszavezetési utat, és az időzítő kondenzátor csomópontját tartsd távol a kapcsolóáramoktól.

## 6. Erősítőosztályok: A, B, AB és D

| Osztály | Vezetés                        | Előny                   | Hátrány                     |
|---------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| A       | aktív eszköz $\sim 360^\circ$  | jó linearitás, egyszerű | rossz hatásfok, meleg       |
| B       | egy eszköz $\sim 180^\circ$    | jobb hatásfok           | crossover torzítás          |
| AB      | $>180^\circ$ , de $<360^\circ$ | jó kompromisszum        | bias és hőstabilitás        |
| D       | kapcsolóüzemű PWM/PDM          | nagyon jó hatásfok      | EMI, kimeneti szűrő, layout |

### Mi történik D osztályban?

A végtranzisztorokat nem lineáris tartományban 'félig nyitva' használjuk, hanem gyorsan ki/be kapcsoljuk. Az audioinformáció a kapcsolási jel kitöltési tényezőjében van; a terhelés és/vagy LC szűrő visszanyeri az alacsony frekvenciás jelet.

Az elméleti előny: a kapcsoló vagy kis feszültségeséssel vezet, vagy kis áram mellett zár, ezért  $P=UI$  vesztesége alacsony. Valós veszteségek:  $R_{DS(on)}$ , kapcsolási átfedés, gate-meghajtás, dead-time, mágneses és ESR veszteségek.

### B osztály crossover

Komplementer push-pull fokozatnál a nullaátmenet környékén egyik tranzisztor sem vezet eléggé. AB bias kis nyugalmi árammal áthidalja ezt, de növeli a disszipációt.

## 7. Kapcsolóüzemű tápegység - az energia csomagokban mozog

### Alapblokkok

- Bemeneti védelem és EMI-szűrő
- Egyenirányítás / PFC, ha szükséges
- Kapcsolóelem + vezérlő
- Energiatároló induktivitás vagy transzformátor
- Egyenirányítás / szinkron MOSFET
- Kimeneti LC/C szűrés
- Visszacsatolás és védelem

### Buck

Lefelé konvertáló DC/DC. Ideális, folytonos vezetésű közelítésben  $V_{out} \approx D \cdot V_{in}$ , ahol  $D$  a kitöltési tényező.

### Boost

Felfelé konvertáló. Ideális közelítésben  $V_{out} \approx V_{in} / (1 - D)$ .

### Flyback

Izolált tápoknál gyakori. A 'transzformátor' valójában csatolt induktivitásként energiát tárol: a primer bekapcsolási idő alatt mágneses energiát vesz fel, kikapcsoláskor a szekunder felé adja le.

### Miért kell szűrés?

A kapcsolójel szándékosan nagy  $dv/dt$  és  $di/dt$  értékű. A kimeneti C/LC szűrő csökkenti a ripple-t; a bemeneti EMI szűrő megakadályozza, hogy a kapcsolási energia visszajusson a hálózat/kábel felé. A snubber és clamp a szórt induktivitás okozta túllövést csillapítja.

### A képlet nem a teljes terv

A buck  $V_{out} = D \cdot V_{in}$  képlete nem mond semmit a ripple-ről, tranziens válaszról, stabilitásról, MOSFET veszteségről, induktor telítésről, EMI-ről vagy a PCB-hurok induktivitásáról. Ezek döntenek el, hogy a valódi tápegység működik-e.

### Visszacsatolás

A szabályozó a kimenetet referenciaértékhez hasonlítja, majd a duty/frekvencia/áramcsúcs módosításával korrigál. A kompenzáció feladata, hogy a hurok gyors legyen, de ne oszcilláljon.



## 8. PCB-tervezés - amikor a geometria alkatrészé válik

### A vezetősávnak van R, L és C értéke

Minden vezetősávnak van ellenállása és induktivitása; a közeli rétegek/sávok között kapacitás alakul ki. A probléma nem pusztán a kapcsolási frekvencia: egy 100 kHz-es SMPS kapcsolóele néhány ns lehet, ezért a harmonikus tartalom sok tíz-száz MHz-ig terjedhet.

### Kritikus hurok

Minimalizáld a nagy  $di/dt$  áramhurokok területét. Bucknál a bemeneti kerámia kondenzátor, high-side/low-side kapcsolók és föld közötti 'hot loop' különösen kritikus. Flybacknál a primer kapcsolóhurok és a szekunder egyenirányító hurok.

### Gate-hurok

A gate driver és MOSFET/GaN közötti út legyen rövid és kis induktivitású. A közös source-induktivitás negatív visszacsatolást, ringinget vagy hamis bekapcsolást okozhat. Kelvin source kapcsolat sok teljesítményeszköznél ezért fontos.

### Decoupling

A 100 nF kondenzátor akkor ér valamit nagy frekvencián, ha fizikailag közel van az IC táp- és földlábához, és kicsi a hurokterület. Egy 5 cm-re lévő 'ugyanolyan' kondenzátor nagyfrekvenciásan teljesen más alkatrész.

### Visszavezetési út

A jeláram mindig zárt hurkot alkot. Nagy frekvencián a visszatérő áram a jelvezető alatt, a referencia síkon szeret haladni. Síkrés, rétegváltás vagy hosszú kerülő megnöveli a hurok induktivitását és EMI-t.

### Riasztó példák

- Kapcsolócsomópont rézfelületét túl nagyra rajzolod → nagyobb kapacitív kisugárzás és common-mode EMI.
- Gate vezeték 5-10 cm → induktív ringing, lassú/instabil kapcsolás, akár tranzisztorhiba.
- MLCC a rajzon a MOSFET mellett, a panelen a csatlakozónál → a nagy  $di/dt$  áram hosszú hurkon folyik.
- Analóg feedback vezeték a switch node mellett → zajt szed össze, jittert vagy instabil szabályozást okoz.
- Földsíkon rés a gyors jel alatt → a visszaáram kerül, a hurok antennává válik.

### Ökölszabály

A gyors áramhurokot ne csak elektromos kapcsolásként nézd: rajzold rá a PCB-re, merre folyik az áram az ON és OFF állapotban. Ha nagy a hurok, a terv gyanús.

## 9. Miért jó a GaN? - és miért nehezebb vele tervezni

A GaN teljesítménykapcsolók kisebb töltésekkel és nagyon gyors kapcsolással dolgozhatnak, ezért a kapcsolási veszteség csökkenthető, a frekvencia növelhető, a transzformátor/induktor és egyes szűrőelemek pedig kisebbek lehetnek. A nagyobb frekvencia azonban nem 'ingyenes': a PCB parazita induktivitása, ringing, gate-meghajtás és EMI egyre kritikusabb.

### 65 W USB-C PD töltő - hozzávetőleges blokkdiagram

230 VAC → biztosító/MOV/EMI → egyenirányító → nagyfeszültségű DC busz → GaN flyback → izolációs transzformátor → szinkron egyenirányítás → kimeneti szűrés → USB-C PD vezérlő → 5/9/15/20 V profilok.

### Konkrét referencia: TI TIDA-050072 / PMP41117 jellegű megoldások

A Texas Instruments 65 W-os GaN USB-PD referenciái 90-264 VAC bemenetről 5-20 V kimeneteket céloznak. A TIDA-050072 quasi-resonant flyback topológiával 65 W-on 20 V / 3,25 A kimenetet ad, és a publikált teljes terhelésű hatásfok 230 VAC-nál 94,32%. A PMP41117 dual-port megoldás integrált GaN flybacket használ, a második DC/DC fokozat 500 kHz-es buck, és a megadott PCB-alapú teljesítménysűrűség 2,3 W/cm<sup>3</sup>.

### Mi történik egy 65 W-os töltőben?

| Üzemállapot    | PD feszültség | Max. áram példa | Teljesítmény |
|----------------|---------------|-----------------|--------------|
| telefon / alap | 5 V           | 3 A             | 15 W         |
| gyors töltés   | 9 V           | 3 A             | 27 W         |
| közepes        | 15 V          | 3 A             | 45 W         |
| laptop         | 20 V          | 3,25 A          | 65 W         |

A PD vezérlő a CC vezetékeken kommunikál, és csak egyeztetés után emeli a VBUS-t a magasabb profilra. A primer szabályozó közben úgy módosítja az energiaátvitelt, hogy a kért kimenet stabil maradjon.

### Veszteségi gondolkodás

94% hatásfoknál 65 W kimenethez a bemenet kb. 69,1 W, tehát ~4,1 W hő keletkezik. Ez kevésnek hangzik, de egy tenyérnél kisebb zárt adapterben komoly hőtervezési feladat.

A TI TIDA-050072 65 W-os referenciája 25,29 W/in<sup>3</sup> teljesítménysűrűséget és 94,32% teljes terhelésű hatásfokot közöl 230 VAC bemeneten. A frissebb PMP41163 alacsony profilú GaN flyback referencia <10 mm magasságot és >92,4% hatásfokot ad meg 90 VAC-nál.

### GaN tervezési lényeg

A GaN nem attól jó, hogy 'jobb MOSFET'. A rendszerelőny akkor jelenik meg, ha a gyorsabb kapcsolást a mágneses alkatrészek, driver, layout, termika és EMI együtt ki tudja használni.

## 10. Hibakeresés, mérés és vizsgagondolkodás

### Oscilloszkóp: a mérővezeték is alkatrész

A hosszú krokodil-földvezeték induktivitása hamis ringinget mutathat. Gyors switch node méréshez rövid ground spring, megfelelő sávzélesség és - hálózati primer oldalon - megfelelő differenciális/izolált mérési módszer szükséges.

### Tipikus hibajelenségek

| Tünet              | Lehetséges ok                                              |
|--------------------|------------------------------------------------------------|
| MOSFET meleg       | nagy RDS(on), lassú gate, túl nagy f, rossz dead-time      |
| ringing            | parazita L/C, hosszú hurok, túl gyors él                   |
| instabil kimenet   | rossz kompenzáció, feedback zaj, LC rezonancia             |
| nagy ripple        | keves C, nagy ESR, induktor érték/telítés, layout          |
| EMI bukás          | nagy hot loop, switch-node felület, rossz CM/DM szűrés     |
| 555 random trigger | tápjaj, rossz decoupling, hosszú threshold/trigger vezeték |

### Vizsgán gyakran kérdezhető

- Mi a különbség BJT és MOSFET vezérlése között?
- Miért kell gate-ellenállás, ha a MOSFET gate-je 'nem vesz fel DC áramot'?
- Miért csökken egy X7R MLCC effektív kapacitása DC bias mellett?
- Miért rezonálhat egy LC szűrő, és hogyan csillapítható?
- Miért kritikus a PCB hurokterülete kapcsolóüzemű tápban?
- Mit jelent az op-amp virtuális rövidzár fogalma, és mikor nem érvényes?
- Mi a 555 monostabil és asztabil mód közötti különbség?
- Miért hatékonyabb a D osztály, mint az A osztály?
- Miért lehet GaN-nal kisebb a töltő, és miért nő közben az EMI-kockázat?

### 10 másodperces ellenőrzőlista

- Feszültség- és áramhatár rendben?
- Disszipáció és hőmérséklet rendben?
- Kondenzátor ESR/ESL és DC-bias figyelembe véve?
- Induktor nem telítődik?
- Gate/kapcsolóhurok rövid?
- Decoupling tényleg a lábnál?
- Feedback távol a zajos csomóponttól?
- Visszaáram útja folytonos?
- EMI-szűrő csillapított és terheléssel is stabil?
- Mérés nem hoz létre új hurokot?

## 11. Képlet- és fogalomlap

| Téma                 | Összefüggés                    |
|----------------------|--------------------------------|
| Ohm                  | $U=RI$                         |
| Teljesítmény         | $P=UI=I^2R=U^2/R$              |
| RC időállandó        | $\tau=RC$                      |
| RL időállandó        | $\tau=L/R$                     |
| Kondenzátor energia  | $E=\frac{1}{2}CU^2$            |
| Tekercs energia      | $E=\frac{1}{2}LI^2$            |
| Kapacitív reaktancia | $X_C=1/(2\pi fC)$              |
| Induktív reaktancia  | $X_L=2\pi fL$                  |
| LC rezonancia        | $f_0=1/(2\pi\sqrt{LC})$        |
| RC határfrekvencia   | $f_c=1/(2\pi RC)$              |
| Op-amp invertáló     | $A_v=-R_f/R_{in}$              |
| Op-amp nem invertáló | $A_v=1+R_f/R_g$                |
| 555 monostabil       | $t\approx 1,1RC$               |
| 555 asztabil         | $f\approx 1,44/((R_A+2R_B)C)$  |
| Buck ideális         | $V_{out}\approx D\cdot V_{in}$ |
| Boost ideális        | $V_{out}\approx V_{in}/(1-D)$  |

Forrásjegyzet az esettanulmányhoz: Texas Instruments TIDA-050072, PMP41117 és PMP41163 65 W GaN USB-PD referenciaanyagok (2025-2026 körüli publikált adatok).