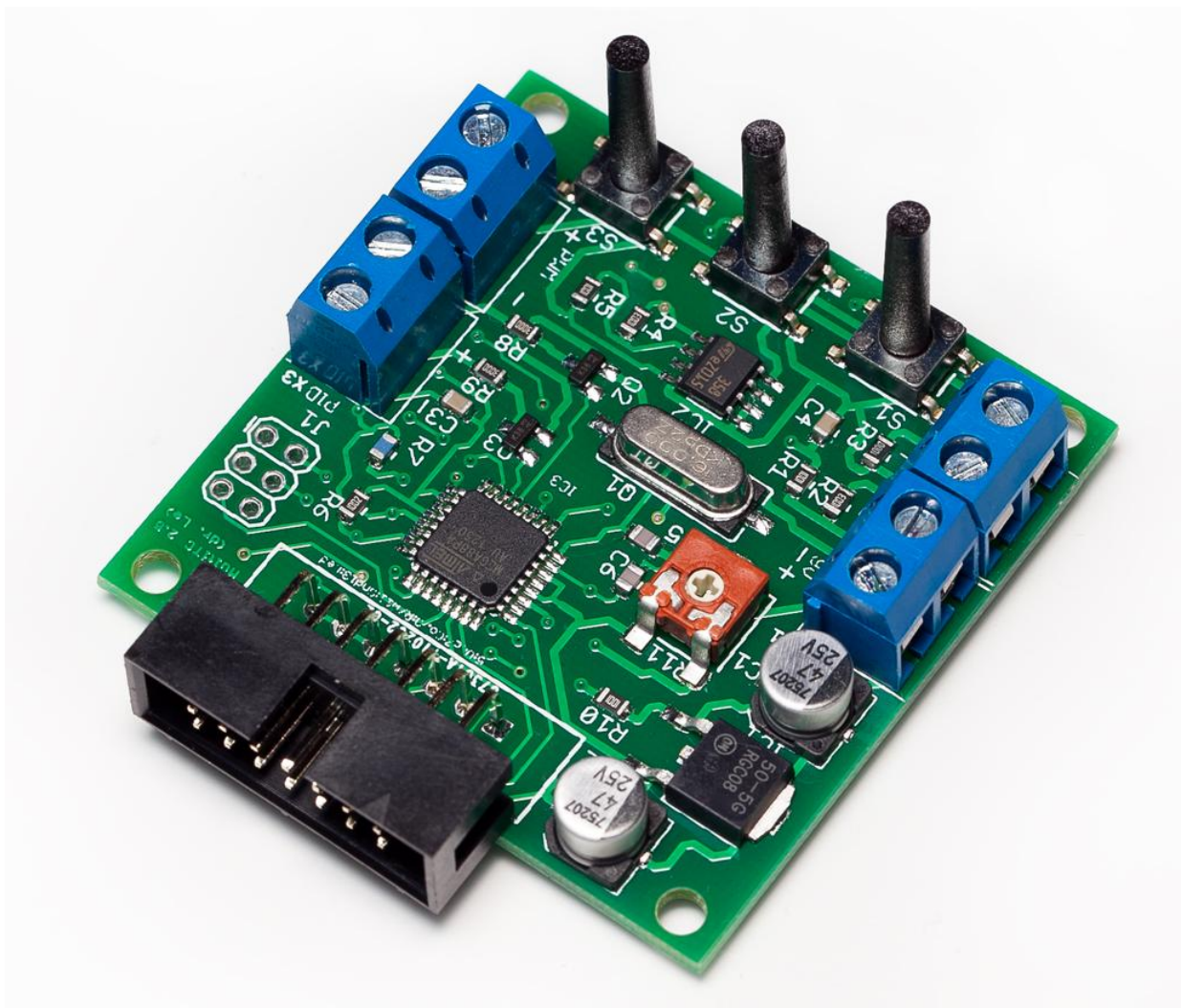


2.5F MultiTC (Multi Function PID Temperature Controller) – © dr. Le Hung

A 2.5F MultiTC egy precíziós PID működésű hőmérséklet-szabályozó, egyben reflow-kemence vezérlő és BGA távolító / BGA reflow forrasztó / BGA újra-forrasztó vezérlő is, melyben a kívánt hőmérsékletek, a hőmérséklet profilok (8 db különböző programozható profil) és a PID paraméterek könnyen beállíthatók. A működése egy AVR ATmega88PA-AU SMD mikroprocesszor képességein alapszik. Egy-egy vezérlő-készlet 1 db galvanizált, kétoldalas, professzionálisan gyártott PCB-n összeszerelt, tesztelt és kalibrált vezérlőből, 1 db szintén szerelt, tesztelt LCD megjelenítőből, valamint 1 db K-típusú hő-érzékelőből áll. A vezérlő-készlet hobbi mennyiségben áll rendelkezésre.

- Honlap: <http://multitc.atwebsites.com/hu>
- E-mail: hutale@gmail.com



2.5F MultiTC PID vezérlő jellemzői:

- MultiTC: Multi funkciós hőmérséklet-vezérlő, K-típusú hő-érzékelővel, hideg-pont hőmérsékletének NTC termisztorral történő mérésével kompenzálva.
- Hőmérő.
- Egyszerű óra és időzítő (pl. beállítható, hogy adott ideig kapcsoljon be egy fogyasztót, és ez idő alatt annak a hőmérsékletét egy előreprogramozott értéken tartsa). Az

időzítés 1mp-18000 mp (5 óra) közötti időtartamra állítható be. Létezik egy másik verzió, az ún. perc-alapú MultiTC PID vezérlő verzió, ahol az időzítés 1perc-18000 perc (300 óra) közötti időtartamra állítható be.

- 2 db külön beállítható kimenet (PID / PWM), 2 db elektromos berendezés működtetésére.
- PID szabályozással, egy előre beállított hőmérséklet szinten tartása. A szinten tartandó hőmérséklet beállítható 0-500°C között. A PID (proportional-integral-derivative = arányos-integráló-deriváló) vezérlő egy szabályozóköri, visszacsatolási mechanizmussal (szabályozóval), melyet széles körben használnak az iparban különböző ellenőrző rendszereknél. A PID-szabályozó folyamatosan kiszámítja a folyamatban mért változó érték és a kívánt érték közötti különbséget (az ún. „hibát”). Egy PID hőmérséklet-szabályozó megpróbálja ezt a hőmérsékleti „hibát” azáltal minimalizálni, hogy folyamatosan korrigálja az elektromos fűtőberendezés teljesítményét. A PID vezérlő azáltal, hogy megakadályozza a hibák bekövetkezését, biztosítja a készülék minél egyenletesebb működését (további részletek találhatóak az interneten).
- PID rámpa-szabályozással, egy fűtő (pl. hagyományos fűtő, reflow-kemence, IR infravörös fűtő, lámpa, halogén lámpa, stb.) előre programozott hőmérséklet-profil szerinti fel- és lefűtése. A hőmérséklet-profilnak 6 szakasza (a perc-alapú verzióban 12 szakasz) lehetséges. A MultiTC PID vezérlőben 8 különböző programozható profilja található (pl. ólmos forrasztás / paszta profil, ólommentes forrasztás / paszta profil a kemencében való használatához; ólmozott vagy ólommentes forrasztás / paszta profilok a BGA forrasztásához, stb.)
- Választható, hogy a felfűtési folyamat elején és végén egy második villamos berendezést (pl. ventilátort) egy előre meghatározott teljesítménnyel a PWM kimenet segítségével működtessen (pl. a művelet elején kis sebességgel keringesse a levegőt a kemencében, a végén viszont nagyobb sebességgel hűtse le a kemencét), illetve a folyamat végén hangjelzést adjon.
- Beállítható, hogy a második villamos berendezést előre beállított teljesítménnyel folyamatosan működtesse (pl. működjön folyamatosan egy alsó fűtés vagy egy ventilátor 25%-s teljesítménnyel).
- A PID paraméterek, a profil adatok, a működési módok manuálisan beállíthatók 3 db nyomógomb és a 2x16 karakteres LCD megjelenítő használatával.
- A PID paraméterek (3 db paraméter: Kc, Ti, Td) a legoptimálisabbak, ha manuálisan vannak meghatározva a konkrét villamossági fogyasztóhoz - a legoptimálisabb paraméterekkel a felfűtés a leggyorsabban áll be a beállított hőmérsékletre, a legkisebb hőmérséklet-kilengéssel. A MultiTC vezérlő PID paraméterei 800-900W teljesítményű alsó, felső fűtésű berendezésre (pizza sütőre) vannak megadva. Kiderült, hogy ezek a paraméterek szintén jól használhatók a BGA forrasztási, újraforrasztási munkákhoz, amikor a BGA-t melegítjük valamilyen halogén égővel (ld. videó) vagy néhány száz Wattos IR kerámiás fűtőtesttel. Ettől nagyon eltérő teljesítményű berendezés használata esetén a jobb szabályozás érdekében a PID paramétereket meg kellene változtatni. A számításokhoz egyszer el kell végezni egy hőmérsékletmérési sorozatot: 30 mp-nkénti hőmérsékletmérés, kb. 30 percig (számos, a számítással kapcsolatos információ megtalálható az Interneten). A mérési adatok birtokában a PID paraméterek kiszámíthatók. A dokumentum végén leírom a módszert, amit használok a paraméterek meghatározásához.
- Szabályozási hőmérséklet-tartomány: 0-500°C fok.
- Hőmérsékletmérés pontossága: 2°C fok.
- Fogyasztás: 20 mA (LCD háttér világítása mellett), villamos fogyasztó kapcsolgatása nélkül.
- A MultiTC PID vezérlő kettő villamos fogyasztót tud kapcsolni. Egy fogyasztó működtetésekor pluszban 10-15 mA-t, kettő esetén pluszban 20-30 mA-t fogyaszt.

- A MultiTC egy komplett hőmérséklet-vezérlő. Használatához számítógép nem szükséges.

2.5F MultiTC PID vezérlő tartalma:

- 1 db alkatrészekkel szerelt PCB.
- 1 db 2x16 karakteres LCD display, szerelt összekötő szalagkábelrel.
- 1 m K-típusú hő-változásra érzékeny hő-érzékelő (ha az érzékelő végét nézzük, az csupaszon van, azaz az nincsen rögzítve valamilyen fémhez vagy fémcsőben, mely a nagy hő-tömege miatt érzéketlenebb a hő-változásra). A hőszabályozás szempontjából az érzékelő annál jobb, minél érzékenyebb a hő-változásra. Ez különösen érvényesül reflow-kemence használata vagy BGA forrasztási munkák esetén.
- Kompletten tesztelve, beállítva, kalibrálva.

Teljes működéséhez szükség van még:

- 1 db 6-9V áramforrásra.
- 1 vagy 2 db szilárdtest relére (vagy triakos teljesítmény-kapcsolóra - ez egy egyszerű kapcsolás, mely nagyon könnyen elkészíthető. A honlapomon található egy nyákterv, amit készítettem az egyik gyári ajánlású kapcsolás alapján, ami nálam jól bevált).
- 1 db fűtőberendezésre (ez lehet egy normál fűtőtest; vagy egy kemence alsó, felső fűtéssel a reflow forrasztáshoz; vagy egy min. 100W halogén égő, de inkább javasolt egy 400-450W IR kerámiai fűtőtest és egy előmelegítő a BGA forrasztásához). Nagyon fontos, hogy a fűtőberendezés jól legyen szigetelve, hogy minél hamarabb tudjon felfűteni a maximális hőmérsékletre. A szigetelés történhet üveg- vagy kő-gyapottal, mely alumínium fóliával betekerhető.
- Esetleg 1 db ventilátorra.
- Esetleg 1 db piezo hangszóróra (vagy normál hangszóróra), ha hangjelzést szeretnénk.

2.5F MultiTC PID vezérlő működése, beállítása:

A MultiTC vezérlő a bekapcsolása után, vagy a működése során az LCD display első sorában az idő, a beállított (elérendő) hőmérséklet, a második sorban az aktuális teljesítmény és az aktuális hőmérséklet látható.

A menügomb nyomására a MultiTC PID vezérlő működését, illetve a paramétereit állíthatjuk be. Alapvetően a menügomb újabb megnyomásával a következő menüt mutatja meg a szoftver. A látható aktuális érték a másik két beállító (érték-növelő vagy érték-csökkentő) gomb nyomásával megváltoztatható. Amennyiben 8 mp-ig nem történik gombnyomás, akkor a program kilép a menüből, vagy ha valamelyik kimenet (PID / PWM) be lett kapcsolva, akkor a kiválasztott programot indítja el. A következő menük találhatók:

- **SP = x, °C:** Beállítandó hőmérséklet, amit el kell érni (SP=Set Point) a PID=ON mód használat esetén.
- **PROG = x:** Használandó profil, amely szerint a PID programozottan vezérelni fog. **8 program közül választható.**
- **PID = OFF/ON/PROG:** PID kimenet működése. Beállítható működési módok: OFF/ON/PROG
 - OFF: A kimenet legyen kikapcsolva
 - ON: A vezérlő PID vezérlőként működik, azaz az **SP = x, °C** beállított hőmérsékletet a fűtő teljesítményének folyamatos szabályozásával igyekszik elérni és utána azt állandó szinten tartani.

- *PROG: A vezérlő PID vezérlőként működik - a fűtő teljesítményének folyamatos szabályozásával igyekszik az előre programozott időpontokhoz elérendő hőmérsékleteket elérni (ez egy reflow-kemencében vagy BGA forrasztási munkáknál alkalmazott profil szerinti fel-lefűtés). A profil beállítását ld. később.*
- **PWM = OFF/ON/PROG/SOUND:** PWM kimenet működése. Beállítható működési módok: OFF/ON/PROG/SOUND
 - **OFF:** A kimenet legyen kikapcsolva.
 - **ON:** A kimenet a megadott PWM=x% teljesítménnyel működik (a PWM=x% beállítását ld. később).
 - **PROG:** Ha a vezérlő PID kimenete PROG módban működik, akkor a PWM kimenete a program kezdetén a PWM=x% paraméterben megadott teljesítménnyel (pl. kis ventilátor-fordulatszám), a program befejezése után pedig a PWMPROG=x% teljesítménnyel (pl. nagyobb ventilátor-fordulatszám) működik (a PWMPROG=x% beállítását ld. később).
 - **SOUND:** Ha a kimenetre egy piezo hangsugárzót kötünk, és itt a SOUND módot választjuk, akkor a PWM kimeneten csipogás hallható, amikor a PID=PROG folyamatnak a felfűtése befejeződik (így pl. jelezve a reflow folyamatnak a végét - a kemence ajtaját ki kell nyitni a gyorsabb hűtéshez).
- **Run?** Kilépés vagy futtatás? Ha nem állítottunk be semmilyen módot a PID/PWM kimenetekre (PID=OFF, PWM=OFF), akkor a menüből kilépünk. Ha bármelyik módot (módokat) beállítottuk, akkor azt (azokat) működésbe hozzuk – ekkor az LCD display-en az eltelt idő, a beállított hőmérséklet (SP), a PID teljesítmény és az aktuális hőmérséklet látható. PROG program-mód esetén a szoftver az adott szakaszok végén elérendő hőmérsékleteket automatikusan megjeleníti.
- **PIDmin = x,%:** A PID kimenetre ez legyen a legkisebb alkalmazható teljesítmény (alap érték: 0%).
- **PIDmax = x,%:** A PID kimenetre ez legyen a legnagyobb alkalmazható teljesítmény (alap érték: 100%). Ezzel a két paraméterrel szabályozható, hogy a PID kimenet milyen teljesítmény-tartományban vagy akár csak egy adott teljesítménnyel működjön.
- **PWM = x,%:** A PWM kimenet ezzel a teljesítménnyel működjön a PWM=ON vagy a PWM=PROG & PID=PROG mód működése során (pl. kisebb teljesítmény, kisebb ventilátor-fordulatszám).
- **PWMPROG = x,%:** A PWM kimenet ezzel a teljesítménnyel működjön a PWM=PROG & PID=PROG mód működése végén (pl. nagyobb teljesítmény, nagyobb ventilátor-fordulatszám).
- **t1 = x,s:** A PROG profil 1. szakasz végének időpontja (pl. előmelegítési szakasz, 180 mp-ig).
- **T1 = x,°C:** A PROG profil 1. szakasz végén elérendő hőmérséklet (pl. előmelegítési szakasz végén érjen el 140°C).
- **t2 = x,s:** A PROG profil 2. szakasz végének időpontja.
- **T2 = x,°C :** A PROG profil 2. szakasz végén elérendő hőmérséklet.
- **t3 = x,s:** A PROG profil 3. szakasz végének időpontja.
- **T3 = x,°C :** A PROG profil 3. szakasz végén elérendő hőmérséklet.
- **t4=x,s:** A PROG profil 4. szakasz végének időpontja.
- **T4 = x,°C :** A PROG profil 4. szakasz végén elérendő hőmérséklet.
- **t5 = x,s:** A PROG profil 5. szakasz végének időpontja.
- **T5 = x,°C :** A PROG profil 5. szakasz végén elérendő hőmérséklet.
- **t6 = x,s:** A PROG profil 6. szakasz végének időpontja.
- **T6 = x,°C :** A PROG profil 6. szakasz végén elérendő hőmérséklet.
- **Perc-alapú MultiTC vezérlő verzióban még további 6 szakasz (t7...t12 és T7...T12) található. Itt az időpontok nem mp, hanem perc alapúak.**

Tapasztalataim szerint 4 vagy 5 szakasz megadása bőven elegendő a reflow forrasztáshoz.

A MultiTC PID vezérlőben a következő profile-ok vannak megadva:

- **0. profil:** reflow kemence, ólmozott paszta
- **1. profil:** reflow kemence, ólom-mentes paszta
- **6. profil:** BGA forrasztás, ólmozott paszta
- **7. profil:** BGA forrasztás, ólommentes paszta
- **2-5 profil:** hőmérséklet-tartás 65°C / 140°C / 185°C / 235°C fokon

Természetesen ezek bármikor megváltoztathatók. **Figyelem!** Amennyiben azt tapasztaljuk, hogy a BGA-k nem vagy nehezen jönnek fel (a fűtés egyenetlensége miatt) akkor 5-10C fokkal nyugodtan lehet megemelni az előre programozott értékeket!

A következő paraméterek (K_c , T_i , T_d) egy adott fűtőtestre jellemző értékek. A MultiTC vezérlő szoftverében egy 800-900W teljesítményű grillsütő értékei vannak megadva. Amennyiben ettől nagyon eltérő teljesítményű fűtőtest kerül használatra, akkor annak az optimális értékeit meg kell határozni (ld. fent), hogy minél pontosabb szabályozás legyen elérhető általuk.

- **$K_c = x, \%^\circ\text{C}$:** Arányos erősítés.
- **$K_c/? = x$:** A K_c paraméter értékhez tartozó osztó (a tizedes érték beállítási lehetőség). Értéke lehet 1,10,100 (pl. ahhoz, hogy megadjuk a K_c értékét 10.5-re, a következőket vigyük be: $K_c=105$, $K_c/?=10$, így a végeredmény: $105/10=10.5$).
- **$T_i = x,s$:** Integrálási idő.
- **$T_i/? = x$:** A T_i paraméter értékét osztjuk ezzel.
- **$T_d = x,s$:** Deriválási idő.
- **$T_d/? = x$:** A T_d paraméter értékét osztjuk ezzel.
- **$T_s = x,s$:** Hőmérsékletmérési periódusidő, általában 1s.
- **Zero?** A vezérlő hardver megépítése után egyszer elvégzendő, hogy az erősítő offset-jét nullázzuk ki.
- **$T_{corr} = x, ^\circ\text{C}$:** a vezérlő megépítése után, ha szükséges, kalibrálhatjuk a hideg-pont hőmérsékletét. A szoftver egy K típusú hő-érzékelőhöz adott magas fokú polinomokat használ a hőmérséklet kiszámításához, így a mérési pontossága $\pm 2^\circ\text{C}$.
- **$tMode = x$ (csak perc alapú vezérlőben):**
 - $tMode=0$: a felfűtések ideje nem számít. A vezérlő csak akkor kezd időt számolni, amikor a hőmérséklet 2 C fokkal megközelíti a beállított értéket. Csak a hőmérséklet-tartások ideje számít.
 - $tMode=1$: a felfűtések ideje is számít.
- **Save?** Ezzel kimenthetjük az összes paramétert az **EEPROM** nem-felejtő memóriába, így ezek az értékek megőrződnek, még ha a vezérlő ki van kapcsolva.

PID szabályozási paraméterek meghatározása, finomhangolása:

Használhatjuk a COHEN-COON finom hangolási metódust a vezérlő hangolásához. A módszerrel kiszámított paraméterek használatával nagyon stabilan tudunk egy előre beállított hőmérsékletet tartani, hőmérséklet-túllépés nélkül. A fűtési folyamat viszont elég lassú. Így az olyan folyamatokhoz, mint a reflow kemence, BGA reflow forrasztó, ahol gyorsabb fűtés (de jelentős hőmérséklet-túllépés nélkül) szükséges, a paramétereket tovább kell finoman hangolnunk. Ehhez használhatjuk a COHEN-COON módszerrel kapott paraméterek kezdeti

értékként. Ezt a finomhangolást elvégeztem a 900W fűtő esetében. Ennél nagyobb teljesítményű fűtő (pl. 1800W) használatának az esetében további hangolásra lehet szükség.

A COHEN-COON paraméterek meghatározásához a következőt kell tenni:

- Beállítás: **PID max = 30%; PID min = 30%; PID = ON;** a fűtő elkezdi melegíteni 30%-os fix teljesítménnyel.
- Meg kell várni, **amíg a hőmérséklet állandó nem lesz** (ez a hőmérséklet a fűtő teljesítményétől függően 150-180°C lehetséges). A fűtési folyamat eltarthat 15-20 percig. **Ezt az állandó hőmérsékletet jegyezzük fel** kezdési hőmérsékletként.
- Beállítás: **PID max = 40%; PID min = 40%; PID = ON;** a fűtő fog melegíteni 40%-os fix teljesítménnyel.
- Jegyezzük fel az **idő = perc:mp; hőmérséklet = X értékeket minden 30 mp-enként, amíg a hőmérséklet megint állandó nem lesz** (ez a hőmérséklet a fűtő teljesítményétől függően 200-230°C lehetséges). A fűtési folyamat eltarthat 15-20 percig.
- A mért értékek alapján a COHEN-COON képletek segítségével ki lehet számítani a K_c , T_i , T_d paramétereket. Ehhez elkészítettem egy Excel táblázatot, amelynek segítségével a számítások elvégezhetők – ha e-mail-ben kapok mért adatokat, akkor kiszámítom és visszaküldöm az eredményeket (de ha rendelkezésedre áll egy MultiTC PID vezérlő, akkor akár elküldhetem az Excel táblázatomat is, ha kéred).
- Példaként a következő adatokat mértem:

Idő	PV, °C
0:00	156
0:30	158
1:00	161
1:30	165
2:00	169
2:30	172
3:00	174
3:30	177
4:00	179
4:30	182
5:00	184
5:30	185
6:00	187
6:30	189
7:00	190
7:30	192
8:00	193
8:30	194
9:00	195
9:30	197
10:00	198
10:30	199
11:00	200
11:30	200
12:00	201
12:30	201
13:00	201

A vezérlőben előre programozott paramétereket (Ki, Ti, Td) kezdeti értéként használva további finomhangolás végezhető el, amennyiben igény van rá. A következőket érdemes figyelembe venni a további finomhangolásnál:

- A legtöbb esetben egy PI vezérlő használata több mint kielégítő eredményt ad. Ez esetben elegendő a Kc és Ti paramétereket beállítani (a Td értéke ilyenkor 0 – ez alap értéként van beállítva). A D vezérlést nem szokták használni, mert nagyíthatja a zajt és rosszabb lesz a vezérlés. Amennyiben mégis szeretnénk, beállíthatunk egy kis értéket (pl. a képlettel való számoláskor kapott érték egytizede).*
- Ha csökkentjük a Kc és / vagy növeljük a Ti értéket, akkor a vezérlő fogja stabilabban tartani a beállított hőmérsékletet. A beállított hőmérsékletet fogja elérni ingadozás nélkül vagy csak kis ingadozással (igaz, hogy azt lassabban éri el). Ezt a hangolási technikát alkalmazzuk, ha előmelegítőhöz használjuk a vezérlőt, vagy nagyon stabilan szeretnénk tartani egy adott hőmérsékletet.*
- Ha növeljük a Kc és / vagy csökkentjük a Ti értéket, akkor a vezérlő gyorsabban fog fűteni. Ezt alkalmazzuk, ha a vezérlőt rámpa vagy reflow kemence / BGA forrasztó vezérlőként kívánjuk használni.*
- Viszonyítási alapként használható a teljesítmény-arányszám (pl. arány= $1800W/900W=2$) az új Kc / Ti érték (értékek) beállításához. Változtassuk meg az egyik értéket (vagy mind a kettőt) és nézzük meg a hatást. Ennek függvényében további finomhangolás megtörténhet. Ez általában nem hosszú procedura.*
- BGA forrasztó esetében a fűtési sebesség változtatható azáltal, hogy csökkentjük vagy növeljük a felső fűtő és a BGA közti távolságot.*

Hungary, 2021.12.08.

dr. Le Hung