

Koaxiális teljesítményosztók terhelhetőségi kérdései

ETO 621.316.72.016.34:621.372.8

A következőkben koaxiális felépítésű, párhuzamos elágazású, az URH frekvenciasávban működő teljesítményosztók terhelhetőségével kívánunk foglalkozni.

Adott geometriai méretekkel rendelkező teljesítményosztó terhelhetőségét két tényező korlátozza: a koronakisülést létrehozó térerősség és a teljesítményosztó veszteségei miatt jelentkező melegedés. A teljesítményosztó különböző hullámellenállású, légtöltésű koaxiális tápvonalszakaszokból épül fel, így a vizsgálatot minden építőelemre el kell végezni.

A koronakisülés szempontjából a vonalon fellépő teljesítmény csúcserőteke korlátozott így ezt a teljesítménykorlátot szokás csúcsteljesítmény korlátnak is nevezni [1]. A teljesítményosztó melegedése a teljesítmény átlagértékének szab korlátot, így ezt a teljesítménykorlátot átlagteljesítmény korlátnak nevezük. Mindkét teljesítménykorlát függ a környezeti és az üzemi körülményektől, így a teljesítménykorlátok meghatározásakor a vizsgálatainkat adott feltételek mellett kell elvégezni és e feltételek megváltozása esetén a maximális teljesítményértékeket korrigálni kell. A vizsgálatot a továbbiakban merev légdielektrikumú koaxiális tápvonalakra végezzük el, melyek különböző hullámellenállással és geometriai méretekkel rendelkeznek.

1. A csúcsteljesítmény korlát meghatározása

A maximális térerősség a koaxiális tápvonal belső vezetőjének felületén jelenik meg. Az elméletileg megengedhető maximális térerősségértéket számításainkhoz nem használhatjuk fel, mivel a koronakisülés nagyon változó jelenség és a hozzá szükséges térerősség széles értéktartományt felvehet csekély hatásoktól függően (pl. a vezetők felületén levő karcok, porszemcsék, a légdielektrikum hőmérséklete, nyomása stb.). Az elméletileg megengedhető maximális térerősségérték 35%-kal számolva jó gyakorlati értéket kapunk a koaxiális tápvonal belső és külső vezetője között megengedhető maximális egyen- vagy 50 Hz-es csúcs feszültségértékre.

Az alábbi egyenlet a koaxiális vonalban maximuman fellépő térerősségértékből származik és magában foglalja a következő tényezőket: nyomás, hőmérséklet, belső vezető görbülete és az elméleti térerősségérték 35%-os csökkentését [1].

$$U_p = 5,42 \cdot 10^3 \cdot D_1 \delta \left(\ln \frac{D_2}{D_1} \right) \left[1 + \frac{0,435}{\sqrt{D_1 \delta}} \right] [\text{V}] \quad (1)$$

ahol U_p — a belső és külső vezető között megengedhető maximális feszültség (egyen- vagy 50 Hz csúcs) V-ban,

D_1 — a belső vezető külső átmérője cm-ben,
 D_2 — a külső vezető belső átmérője cm-ben,
 δ — a légdielektrikumra jellemző tényező.

$$\delta = 3,92 \frac{p}{T}$$

ahol p — az abszolút nyomás Hgcm-ben,
 T — a hőmérséklet °K-ben.

Az (1) összefüggésből számítható feszültségértékeket rádiófrekvenciás effektív feszültségre kell átszámolni. A koronakisüléshez szükséges térerősség frekvenciafüggésére az [5] irodalom ad utalást, mely szerint ez a térerősség 2 MHz körüli frekvencián veszi fel minimumát (az 50 Hz-es érték 70–80%-át), majd a frekvencia növelésével újból eléri az 50 Hz-es értéket. Így az egyenfeszültségre kapott U_p érték 0,7-szeresét véve (a legrosszabb esetet vesszük figyelembe és a további frekvenciafüggést elhanyagoljuk) és ezt $\sqrt{2}$ -vel osztva az RF-feszültség effektív értéke adódik. Ezt az értéket rendszerint még egy S_f biztonsági tényezővel osztják, melynek értéke általában 2. Ez onnan adódik, hogy a belső vezető tartó dielektromos kitémasztó helyén, a belső vezető és az ϵ_r dielektromos állandójú kitémasztó tárcsa közötti légrétegben a térerősség közelítőleg ϵ_r -szeres értéket vesz fel [5]. Az alkalmazott kitémasztók általában $\epsilon_r \approx 2$ dielektromos állandójú szigetelő anyagból készülnek.

Ily módon

$$U_{RF} = \frac{0,7 U_p}{S_f \sqrt{2}} = 0,247 U_p \quad (2)$$

A (2)-vel számított U_{RF} feszültség és a hullámellenállás Z_0 ismeretében a csúcsteljesítmény korlát

$$P_{pk} = \frac{U_{RF}^2}{Z_0} [\text{watt}] \quad (3)$$

Az (1), (2) és (3) összefüggések felhasználásával $Z_0 = 10$ ohmtól 120 ohmig, $D_2 = 1$ cm-től 10 cm-ig végeztünk számításokat a csúcsteljesítmény korlát értékére 40 °C környezeti hőmérséklet és $p = 76$ Hgcm nyomás esetén [10]. A (3) alapján számított értékeket tovább kell csökkenteni, ha a tápvonalon haladó jel amplitúdómodulált (a modulációs index m) és a tápvonalon r állóhullámarány is fellép:

$$P'_{pk} = P_{pk} \frac{1}{r(1+m)^2} \quad (4)$$

A teljesítményosztó csúcsteljesítményre történő méretezését normál üzemi körülmények mellett kell elvégezni (tv-adók esetén a tápvonalrendszerre és az antennákra a szokásos állóhullámarány-érték $r < 1,1$).

Tv-jelek esetén pozitív modulációt feltételezve a szinkronjel csúcsok 100%-os AM-nek felelnek meg, így a modulálatlan esetnek megfelelő P_{pk} érték $1/4$ -ére történik a méretezés.

2. Az átlagteljesítmény korlát meghatározása

A megengedhető maximális átlagteljesítményt a tápvonal szerelvények melegezése korlátozza, mely a tápvonal veszteségek által jön létre. A maximálisan elérhető működési hőmérsékletet különböző tényezők határozzák meg:

- a dielektromos kitámasztó hőmérséklete nem közelítheti meg annak lágyulási pontját, mert ekkor a belső vezető helyzete megváltozhat,
- magas hőmérsékleten a belső vezető és a kitámasztó között kémiai hatás léphet fel,
- a tápvonal építőelemek hőtágulása és oxidációja.

A koaxiális konstrukció felépítéséből következik, hogy a maximális hőmérséklet a belső vezető felületén lép fel, így ennek megengedhető értéke korlátozza a maximális átlagteljesítményt. A maximálisan megengedhető belső vezető értékére a szakirodalmi utalások [1], [2], [3], [4] eléggé eltérő értékeket adnak meg. Az [1]-ben megadott értéket elfogadva $\theta_1 = 100$ °C maximális belső vezető hőmérséklet értéket feltételezve végezhetjük el az átlagteljesítmény meghatározására vonatkozó számításokat. A szigetelő anyagok közül pl. a teflon 300 °C-ig megőrzi szilárdságát [8], így a felvett érték nem túl szigorú.

Az átlagteljesítmény meghatározásakor feltételezzük:

- hogy a tápvonalban keletkező hő csak a tápvonal tengelyére merőleges irányban terjed, longitudinális hőátadás nincs,
- a külső és belső vezetők azonos anyagból készültek,
- a tápvonalban kevés dielektromos tárcsa helyezkedik el, így a melegeedést csak a vezetéstől származó veszteségek okozzák,
- a tápvonalon állóhullám nem lép fel,
- a tápvonalon haladó jel modulálatlan és
- a külső vezetőt körülvevő közeg nyugvó levegő.

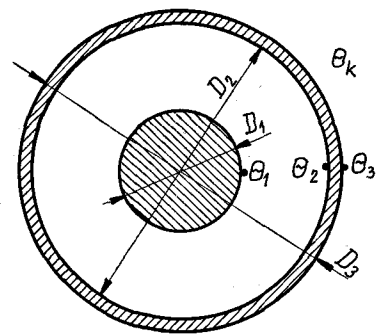
Azzal a feltételezéssel, hogy a tápvonal hossztengele mentén hőátadás nincs, a térbeli hőátadási probléma síkbeli problémába megy át, azaz a számítást elegendő a tápvonal egyetlen keresztmetszeti síkjára elvégezni. Egy ilyen síkot mutat az 1. ábra a későbbiekben használt jelölésekkel. A számítás során felhasználhatjuk a hő és elektromos mennyiségek közötti analógiát [7].

Ismeretes, hogy egy veszteséges tápvonal bemenetétől x távolságra a teljesítmény

$$P = P_0 e^{-2\alpha x} \tag{5}$$

Az egységnyi hosszúságú tápvonalon disszipált hő (5) differenciálásával

$$H = -\frac{dP}{dx} = 2\alpha P \tag{6}$$



- θ_1 = A belső vezető hőmérséklete
- θ_2 = A külső vezető belső felületének hőmérséklete
- θ_3 = A külső vezető külső felületének hőmérséklete
- θ_k = A környezeti hőmérséklet

H301-MG1

1. ábra

A (6)-ban szereplő α csak a rézvesztésből ered. Felbontva a továbbiakban α_r -t a belső és külső vezető veszteségére írható

$$\alpha_r = \alpha_{r1} + \alpha_{r2} \tag{7}$$

A teljes rézvesztés okozta csillapítási tényező (5) alapján feltételezve, hogy mind a belső, mind a külső vezető vörösrézből készült

$$\alpha_r = \frac{4,15 \cdot 10^{-8}}{Z_0} \sqrt{f} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right) = \alpha_{r1} \left(1 + \frac{D_1}{D_2} \right) \left[\frac{N}{cm} \right] \tag{8}$$

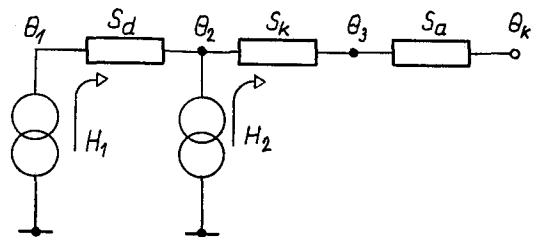
ahol f — a frekvencia Hz-ben,
 Z_0 — a tápvonal hullámellenállása ohmban,
 $D_1; D_2$ — a megfelelő átmérők cm-ben.

A H hőmennyiség is felbontható a belső és a külső vezetőben keletkező hőre

$$H = H_1 + H_2 \tag{9}$$

ahol $H_1 = 2\alpha_{r1}P$ és $H_2 = 2\alpha_{r2}P$

Az 1. ábrán szereplő tápvonalkeresztmetszetre a 2. ábrán látható helyettesítő kép adható meg (felté-



- S_d = A belső és külső vezető közötti hőellenállás
- S_k = A külső vezető hőellenállása
- S_a = A külső vezető és a környezet közötti hőellenállás

H301-MG2

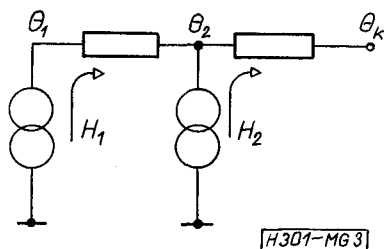
2. ábra

telezve, hogy a hő a legnagyobb hőmérsékletű Θ_1 helyről kifelé áramlik).

Feltételezzük, hogy a külső vezető vastagsága a külső átmérőhöz viszonyítva kicsi és figyelembe vesszük, hogy a vörösréz külső vezető hőellenállása a légdielektrikum és a külső vezető közötti hőellenálláshoz képest elhanyagolhatóan kicsi, azaz

$$S_k \ll S_d \text{ és } S_a; \quad \Theta_2 - \Theta_3 \cong 0 \quad (10)$$

Ekkor a 2. ábrán levő helyettesítő képben S_a rövidzárral helyettesíthető (3. ábra).



3. ábra

Alkalmazva a „hő-Ohm” törvényt a hőmérsékletkülönbségekre az alábbi egyenletek írhatók

$$\Theta_1 - \Theta_2 = H_1 S_d \quad (11)$$

$$\Theta_2 - \Theta_k = (H_1 + H_2) S_a \quad (12)$$

Figyelembe véve (9)-et, (11)-re és (12)-re a következő összefüggéseket kapjuk:

$$\Theta_1 - \Theta_2 = 2\alpha_r P S_d \quad (13)$$

$$\Theta_2 - \Theta_k = H S_a = 2\alpha_r P S_a \quad (14)$$

A feladat belső vezető és a környezeti hőmérsékletkülönbség meghatározása, hiszen adott környezeti hőmérséklet esetén a belső vezető maximális hőmérséklete határozza meg a tápvonalon átvihető átlagteljesítmény maximális értékét. A (13) és (14) összeadásával kapjuk, hogy

$$\Theta_1 - \Theta_k = 2\alpha_r P S_d + 2\alpha_r P S_a \quad (15)$$

Ha ismernénk az S_d és az S_a hőellenállásokat akkor $(\Theta_1 - \Theta_k)$ értékének előírásával (15) összefüggés alapján P értékét meghatározhatnánk. A számítás közvetlenül nem végezhető el, mivel S_d és S_a is a hőmérsékletkülönbség nemlineáris függvényei, így P meghatározása a később bemutatott grafikus módszerrel fog történni.

A légdielektrikum hőellenállásának meghatározása

A belső és a külső vezető közötti hőátadás légdielektrikum esetén hővezetés, hősugárzás és konvekció formájában történik. Összegezve a három hőátadási mód által létrejött hőáramokat, adott hőmérsékletkülönbség esetén az eredő hőellenállás számítható. Felhasználva a [3] szakirodalom által megadott egyenleteket:

A vezetéssel átadott hőmennyiség:

$$H_D = \frac{2\pi(\Theta_1 - \Theta_2)}{G_a \ln \frac{D_2}{D_1}} \left[\frac{\text{watt}}{\text{cm}} \right] \quad (16)$$

ahol G_a — a fajlagos hőellenállás (levegő esetén $G_a = 4100 \text{ cm}^\circ\text{C}/\text{watt}$).

A sugárzással átadott hőmennyiség

$$H_R = \frac{4\pi D_1 \sigma (273 + \Theta_2)^3 E_1 E_2 (\Theta_1 - \Theta_2)}{E_1 + E_2 - E_1 E_2} \left[\frac{\text{watt}}{\text{cm}} \right] \quad (17)$$

ahol σ — a Stefan–Boltzmann állandó

$$\sigma = 5,77 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{watt}}{\text{cm}^2 (\text{°K})^4} \right]$$

$E_{1,2}$ — a külső és belső vezető emissziós tényezője vörösréz esetén, ha a felület nem oxidált [6]

$$E_{1,2} \cong 0,1.$$

A konvekcióval átadott hőmennyiség

$$H_C = K_C D_1^{3/4} (\Theta_1 - \Theta_2)^{5/4} \left[\frac{\text{watt}}{\text{cm}} \right] \quad (18)$$

ahol K_C — a konvekciós tényező.

Összegezve az egyes hőátadási módok által átadott hőt az eredő hőmennyiség

$$H_E = H_D + H_R + H_C \quad (19)$$

melynek ismeretében a légdielektrikum hőellenállása

$$S_d = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{H_E} \left[\frac{\text{cm}^\circ\text{C}}{\text{watt}} \right]. \quad (20)$$

Az elvégzett számítások azt mutatták, hogy kis hullámellenállások esetén a hővezetés, közepes hullámellenállások esetén a hővezetés és a konvekció, nagy hullámellenállások esetén a konvekció határozza meg elsősorban S_d értékét [10].

A környezet és a külső vezető közötti hőellenállás meghatározása

A külső vezető által a környezetnek leadott hőmennyiség az alábbi empirikus összefüggéssel számítható [2], [3].

$$H_{\Theta_2} = \frac{Ak}{l} (\Theta_2 - \Theta_k)^{5/4} \left[\frac{\text{Watt}}{\text{cm}} \right] \quad (21)$$

ahol A — a hőt leadó felület cm^2 -ben,

k — a hőátadásra jellemző állandó, mely a felület minőségének és a D_2 átmérőnek a függvénye,

l — a hőt leadó hengeres külső vezető hossza cm -ben.

Figyelembe véve, hogy $A = \pi D_2 l$ (21) a következő lesz

$$H_{\Theta_2} = \pi k D_2 (\Theta_2 - \Theta_k)^{5/4} \left[\frac{\text{watt}}{\text{cm}} \right] \quad (22)$$

A (22) kifejezés és a hőmérsékletkülönbség ismeretében S_a értéke meghatározható.

A maximálisan megengedhető átlagteljesítmény meghatározása

Mint már említettük S_d és S_a a hőmérséklet-különbség nemlineáris függvényei, így a maximális átlagteljesítményt (a nemlineáris elemeknél oly gyakran alkalmazott) grafikus módszerrel határozzuk meg.

Kifejezve (13) és (14)-ből P értékét, figyelembe véve (11) és (12)-t

$$P = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{2\alpha_{r1} S_d} = \frac{H_1}{2\alpha_{r1}} \quad (23)$$

$$P = \frac{\Theta_2 - \Theta_k}{2\alpha_r S_a} = \frac{H}{2\alpha_r} \quad (24)$$

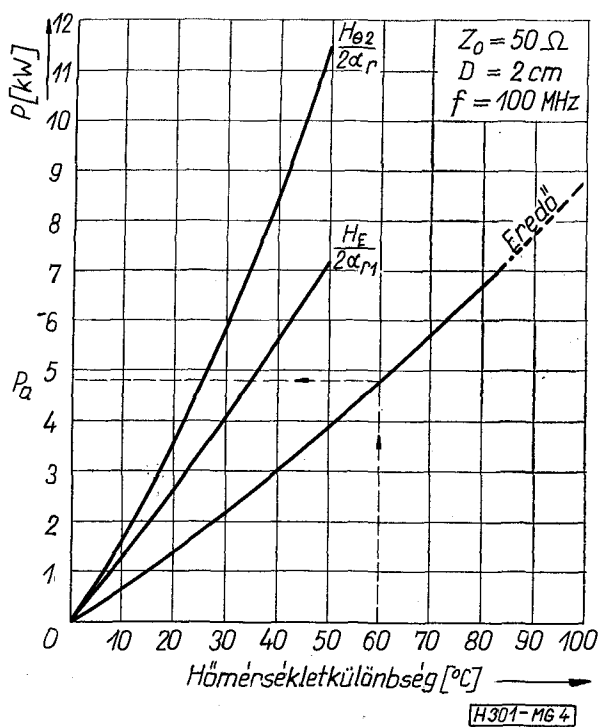
Ha (23)-ban H_1 -et H_E -vel, (24)-ben H -t H_{Θ_2} -vel helyettesítjük, P -t a hőmérséklet-különbségek függvényeként kapjuk

$$P = \frac{H_E}{2\alpha_{r1}} \quad (25)$$

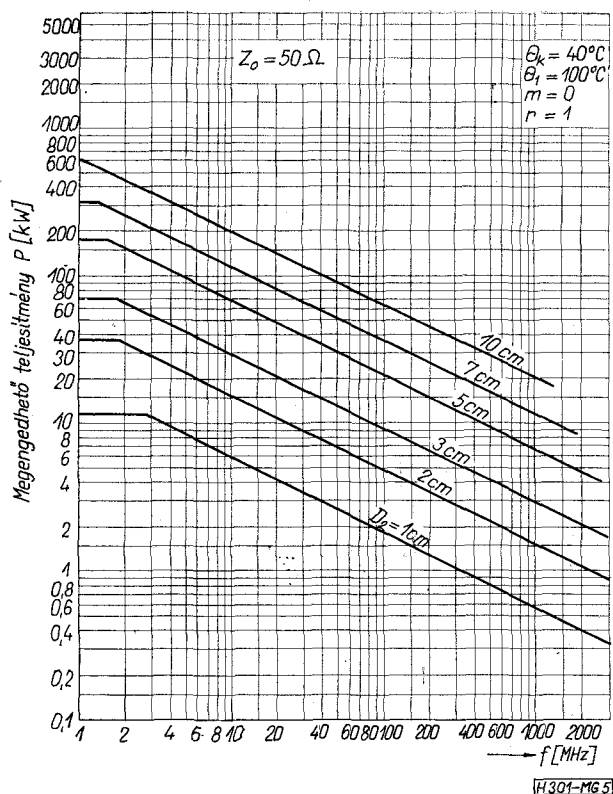
$$P = \frac{H_{\Theta_2}}{2\alpha_r} \quad (26)$$

A $H = H_{\Theta_2}$ fizikai jelentése, hogy állandósult állapotban a tápvonalban keletkezett összes hőt a külső vezetőknek kell átadnia a környezetnek. Meghatározva a (25) és (26) összefüggések számszerű értékét adott hullámellenállás, külső átmérő és 100 MHz frekvencia esetén a hőmérséklet-különbség függvényében, a grafikus szerkesztés, azaz a „melegedési görbe” felvétele elvégezhető. Példaként $Z_0 = 50$ ohm, $f = 100$ MHz és $D_2 = 2$ cm esetén a szerkesztett görbét a 4. ábrán láthatjuk (az eredő szerkesztése az abszcissza értékek összeadásával történt).

Az eredő görbe a maximálisan megengedhető átlagteljesítményt mutatja $(\Theta_1 - \Theta_k)$ függvényében. $\Theta_k =$



4. ábra



5. ábra

$= 40$ °C környezeti és $\Theta_1 = 100$ °C belső vezető hőmérséklet esetén a hőfokkülönbség 60 °C, melyhez a 4. ábra alapján 4,85 kW átlagteljesítmény tartozik. Nagyobb környezeti és változatlan belső vezető hőmérséklet esetén kisebb maximális átlagteljesítmény engedhető meg. Az $f = 100$ MHz-től eltérő f frekvencia esetén figyelembe véve a (8), (25) és (26) összefüggéseket

$$P_a = P_{a100} \sqrt{\frac{100}{f[\text{MHz}]}} \quad (27)$$

A (27) összefüggés csak olyan frekvenciákra érvényes, melyeknél a tápvonalon egy módus a TEM alaplómódus terjed. Az első magasabb módus a TE_{11}^0 határhullámhossza [5] alapján

$$\lambda_{h1} = \sqrt{\epsilon_r} \frac{\pi}{2} (D_1 + D_2) \quad (28)$$

Az átlagteljesítmény korlát értékét az előzőekben leírtak szerint 10 ohmtól 120 ohmig (10 ohmos lépésekben) különböző D_2 külső átmérők esetén meghatároztuk [10] $\Theta_k = 40$ °C környezeti és $\Theta_1 = 100$ °C belső vezető hőmérséklet esetén $f = 100$ MHz-en, feltételezve, hogy a vonalon haladó jel modulálatlan és a vonalon állóhullámok nincsenek, azaz $m = 0$ és $r = 1$.

Kimutatható, hogy m modulációs indexű AM-jel átlagteljesítménye [8] a vivőteljesítmények $\left(1 + \frac{m^2}{2}\right)$ szerese. A gyakorlatban a modulációs index változik (tv képjel esetén 12%-tól 100%-ig bármely értéket felvehet), de ez a változás gyorsabb a tápvonal

hőidőállandójánál, így a moduláció átlagértékével számolhatunk.

Az állóhullámok hatása a melegedésre igen bonyolult. Az áramcsomópontokban létrejött helyi melegedések miatt a tápvonalon longitudinális hőátadás is felléphet a működési frekvenciától függően. A problémát a [3] szakirodalom részletesen tárgyalja, melynek inkább csak elvi jelentősége van. A gyakorlatban előforduló állóhullámarány értékeknél megfelelő biztonsággal úgy végezhető el a méretezés, ha az átlagteljesítményt a tápvonalon fellépő állóhullámarány értékkel osztjuk

$$P'_a = \frac{P_a}{r} \quad (29)$$

Felhasználva a csúcsteljesítményre és az átlagteljesítményre kapott értékeket, valamint a (27) és a (28) összefüggést, a frekvencia függvényében ábrázolhatjuk a tápvonalon átvihető teljesítményt. Példaként egy ilyen ún. terhelhetőségi görbét mutat az 5. ábra, mely 50 ohm hullámmellenállású tápvonal esetén tünteti fel az átvihető teljesítményt. A görbékből látszik bizonyos frekvenciahatárig a csúcsteljesítmény, majd e fölött az átlagteljesítmény szab korlátot az átvihető teljesítménynek. Az átlagteljesítmény korlátot csak olyan frekvenciákig ábrázoltuk, melyeknél a tápvonalon csak a *TEM* alapl módus terjed. Az 50 ohmtól

eltérő hullámmellenállású tápvonalakra a terhelhetőségi görbéket az [10] irodalomban találhatjuk meg.

A terhelhetőségi görbék alapján a teljesítményosztók terhelhetőségre történő méretezése, mely a megfelelő D_2 külső átmérő meghatározását jelenti, elvégezhető.

I R O D A L O M

- [1] Walker: NAB Engineering Handbook pp. 2—189—2—196. Fifth Edition Mc Graw-Hill Book Company New York 1960.
- [2] Dummer, G. W. A., Blackband, V. T.: Wires and RF cables. Chapter 10, pp. 96—125, Pitman LTD London 1961.
- [3] Mildner, R. C.: The power rating of radio-frequency cables Trans. of the AIEE 1949 Volume 68 pp. 289—298.
- [4] Macalpine, William: Heating of Radio-Frequency Cables Trans. of the AIEE 1949 Volume 68 pp. 283—288.
- [5] Istvánffy F.: Tápvonalak, antennák hullámterjedése. Tankönyvkiadó, Budapest, 1967. 1.4.4. és 1.4.5. fejezet.
- [6] Pattantyús: Gépész- és villamosmérnökök kézikönyve. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1961.
- [7] Almássy Gy.: Híradástechnikai mechanikai szerkezetek. Egyetemi jegyzet J5—519.
- [8] Reference Data for Radio Engineers, fourth edition. New York 1959 Chapter 3. pp. 41—74.
- [9] Matthaei, Young, Jones: Microwave Impedance-Matching Networks and coupling structures. Mc Graw-Hill Book Company 1964 London pp. 168—173.
- [10] Mátay Gábor: Teljesítményosztók terhelhetősége. Tématanulmány. Mikrohullámú Híradástechnika Tanszék 1974.