

Korszerű mérési módszerek jegyzőkönyv

Reaktor üzemeltetés

A jegyzőkönyvet készítették: **Márton István, Szigligeti Attila, Szilvási Ádám**

Mérés időpontja: **2010. 04. 29.**

Mérésvezető:
Csige András

Leadás időpontja: **2010. 05. 13.**

I. Bevezetés

A mérést a BME tanreaktorában végeztük el, ahol a moderátor anyag szerepét könnyű víz (H_2O) tölti be. Természetesen a tanreaktor felépítésére részletesen nem térünk ki, egyrészt mert biztonsági okokból nagyon komplex rendszer szükséges, másrészt a vázlatos felépítése megtalálható a jegyzetben, amit nem kívánunk megismételni (ugyanakkor a kiértékelés szempontjából érdekes részleteket megemlíjtük). Fontos még megjegyezni, hogy mint a jegyzőkönyv nevéből látszik, a labor főleg gyakorlati jellegű volt, így az elvégzett műveleteket még közvetlen a mérés elvégzésekor (előtte vagy utána) megvitattuk, illetve megbeszéltük a tapasztalatokat a mérésvezetővel. Gyakorlatilag a jegyzőkönyvre csak néhány számítás elvégzése, a tapasztalatok összegzése maradt.

II. Mérőműszer

Nukleáris reaktor az, ami makroszkópikus méretben szabályozott láncreakció létrehozására képes. Ennek eléréséhez szükségünk volt fűtőanyagra (dúsított urándioxid, lásd később), moderátorra (könnyűvíz), reflektorra (oldalt: grafit és H_2O , alul és felül: H_2O), valamint hosszú nagy teljesítményű üzemelés esetén (ami nálunk nem fordult elő, bővebben lásd később) hűtőközegre (H_2O). A mérés egy rövid ismertető után kezdődött meg, ami során megismertük a reaktor egyes részeit, majd magát az irányítást az operátori szobában végeztük, párosával egyikőnk másodoperátori, míg a másik az első operátori feladatokat ellátva. A reaktor paramétereit három különböző teljesítményen mértük, a láncreakció beindítása, a teljesítmény beállítása, valamint a mérés végeztével a reaktor leállítása (eltérő módokon) az operátorok feladata volt. Miközben végezték a munkájukat, a reaktor állapotát nukleáris mérőláncok segítségével (bővebben lásd a jegyzetben) mértük, amely mérőláncok adatait egy számítógépes rendszer (amely külön erre a célra lett tervezve) lejegyezte, és ezeket az adatokat kaptuk meg végül kiértékelésre. A kért adatok kiszámolásához még szükséges (az egyes teljesítményekhez tartozó) szabályzó rúd állásokat feljegyeztük.

III. Mérés menete, kiértékelés

A) Még nem használt pálcák aktivitásának becslése

1969-ben a BME-s tanreaktort a KFKI-ban végzett ZR5-ös kísérletek előzték meg, majd az ott már letesztelt reaktort építették fel az egyetemen 1971-ben. A reaktorban használt fűtőkazetták az '50-es években csúcsmínőségűnek számítottak, de ma már más típusokat használnak jobb termikus tulajdonságaik miatt. Ám mivel a tanreaktorban nem jelentős a kazetták melegeedése, ezeknek a hatásoknak nincs fokozottan kitéve, így az akkori (KFKI kutatóreaktorában 1967-ig használt) EK-10 típusú szovjet gyártmányú kazettákat használják ma is. Ezeket 1,5 mm-es alumínium burkolat védi a korróziótól (a reaktorban használt alacsony teljesítményen az élettartama egy ilyen kazettának 100 év körül lenne). Egy kazettában 16 db pálcá helyezkedik el, 16 mm-es rácsoszással elválasztva egymástól. Ezeket az egyszerűbb mozgatás kedvéért kengyellel látták el, így a reaktor térbe való behelyezés, illetve kivétel egyszerűbben megoldható. Egy pálcában 80 g 10%-os dúsítású (^{235}U izotópú) $\text{UO}_2 + \text{Mg}$ keverék található (ezáltal jobb a mechanikai és termikus tulajdonságai, megtartja az alakját, jobb hővezető lesz, de morzsolhatóvá válik), ami azt jelenti, hogy egy pálcában 8 g U hasadóanyag található. Érdekesség, hogy a nemzetközileg szabályozott határ szerint 20 % alatt minősül alacsony dúsításúnak a fűtőanyag, amikre jóval kevésbé szigorúak a szabályok, mondván hogy ebből nem lehet atomfegyvert gyártani (természetesen a szám jelentősen alá lö a fegyver szükséges dúsításának, és eléggé hasraütésszerű). Az exponenciális bomlástörvényből kiszámolható ezek kezdeti (reaktortérbe való behelyezés előtti, azaz természetes) aktivitása, ismerv a ^{235}U ~700 millió éves felezési idejét. Átrendezve a bomlástörvényt az aktivitásra (bomlás/másodperc, tehát a felezési időt másodpercbe kell átváltanunk) a következőt kapjuk:

$$A [\text{Bq}] = \{N(0) - N(t)\} / t = \{\ln 2 * N(0)\} / T_{1/2} = \{\ln 2 * N_A * (8/235)\} / T_{1/2} \approx 641.350 \text{ Bq}$$

Ahol az N_A az Avogadro-szám, felhasználva hogy ismerjük a kezdeti hasadóanyag tömegét, illetve a tömegszámot (ami 1 mól anyag tömege grammban).

Összehasonlításképpen az irodalomban utánanéztünk a talaj átlagos természetes radioaktivitásának (természetesen ez függ sok körülménytől, mint a talaj szerkezetétől, a csapadék mennyiségétől, az esetlegesen használt trágya minőségétől), de csak nagyságrendi becslést szeretnénk kapni (mint tettük azt a pálcá esetében). A talajra a főbb radioaktív forrásokat beszámítva (ezek: Radon, tórium, urán, kálium radioaktív izotópjai, amik a teljes aktivitás 98 %-át kiteszi), ~0,5-3 Bq/g-ot kapunk. Magyarul egyetlen pálcá aktivitása (~6 * 10³ Bq), amely átlagosan 420 kg termőföld aktivitásának felel meg. Ez valóban látszik nem egy nagy érték (nap mint nap van ennyi körülöttünk), így (figyelembe véve a pálcák alumínium árnyékolását is) kijelenthető hogy a használat előtti

kazették nyugodtan akár kézzel is megfoghatók. Természetesen a láncreakcióban már használt fűtőanyag aktivitása a használat idejétől függően nagyságrendekkel nagyobb lehet, így azokra ez a megállapításunk már nem érvényes. Sőt használat során maga a „víz” is felaktiválódik, a levegőből a reaktortérben elnyelődő nitrogén a nagy neutronfluxus hatására ^{16}N izotópot hozhat létre, ám ez igen kis (néhány s) felezési idejű, így a reaktor leállása után rövid idővel már nem jelentős a mennyisége. Pont erre szolgál például a pihentető kamra rendszer a primer körben, ahol az ilyen felaktiválódott hűtőközeget tárolni lehet, amíg ezek az izotópok elbomlanak.

B) Reaktor kis teljesítményű üzemeltetése (10 W – 20 W)

3 feladatrészre voltunk hatan, így felosztottuk egymás közt az operátori és másodoperátori feladatokat. Az első operátor kezelte a neutronforrást, húzta fel a biztonságvédelmi rudakat (továbbiakban BV) és szabályzó rudakat, valamint az I1, és I2 impulzus láncokat működés közben ő felügyelte, és állította a méréshatárt. A másodoperátor az E6, és E7 mérőláncokat figyelte, valamint ezek méréshatárát állította. A méréshatár állításnál résen kellett lenni, mert szuperkritikus állapotban ugye exponenciálisan nő a teljesítmény, azaz a műszer a méréshatár feléig lassabban teszi meg az utat, mint a második félen fogja. Ennek megfelelően ökölszabály volt, hogy úgy váltunk teljesítmény, amikor az új méréshatárral már jól látható volt az impulzusláncok által mutatott érték (nagyjából ez az adott maximális kijelzés 1/2-énél már könnyedén teljesült). Kis teljesítményen impulzusüzemű mérőláncokkal határozzuk meg a neutronfluxust (ezek mérik külön az egyes neutronbeütéseket), de látható, hogy ez a neutronfluxus növelésével telítésbe fog menni, egy idő után csak egyenáramot észlelnénk. Az ilyen típusú (I1, I2) detektorok, tehát már nem működnek jól nagy teljesítményen, ott integráló üzemi egyenáramú kamrákkal mérjük a fluxust, ahol pedig nem az impulzusok gyakorisága adja az információt (hiszen az integrálás miatt elveszik) hanem az egyenáram nagysága (E6, E7). A mérés során megállapítottuk azt is nagyjából milyen tartományban nem ad hiteles eredményt már az impulzusüzemű mérés. Megjegyzendő, hogy külön a neutronokat nem tudjuk mérni az ionizációs kamrákban (amik a mérőláncok detektorai), hanem mérjük az n^0 -at és γ fotonokat, majd külön a γ -kat, s az utóbbi detektor jelét levonva az előbbiekből kapjuk egyedül a neutronfluxust a reaktortérben (különbségjel).

Először a reaktort be kellett indítani, ehhez PuBe neutronforrást használtunk, aminek az elve a következő: a Pu alfa sugárzó radioaktív anyag, majd az általa kibocsátott alfa részecskét a Be elnyeli, ami ezután neutront bocsát ki. A neutronforrás ezen összeállítása azért praktikus, mert a Pu hosszú felezési idejű anyag (sokáig közel azonos a forráserőssége), valamint nem bocsát ki kemény γ foton. Ez utóbbi azért fontos, mivel a reaktor árnyékolása felülről 4,8 m vízoszloppal van megoldva, ami neutronok számára valóban megfelelő, ám gamma sugárzó forrásra már nem lenne kielégítő. Oldalról való árnyékolást pedig bárium-szulfáttal kevert nehézbetonnal (űgynevezett baritbetonnal, ez intenzíven csökkenti a γ sugárzást, elektron-foton kölcsönhatás révén) oldották meg, valamint ezt körülvették normál betonnal.

/Megjegyzendő hogy a kijutó sugárzást csökkentendő a besugárzandó anyagokat, amiket egy ferde csövön küldenek le a reaktortérbe, épp azért, hogy a csövön, amiben vákuum van, ne hogy felszökjön sugárzás. Rádásul nem csak közvetlen a reaktor felett jelenne meg ez a sugárzás, hiszen beemelő daru fémváza szétszórná a fotonokat, ami szintén elkerülhető így./

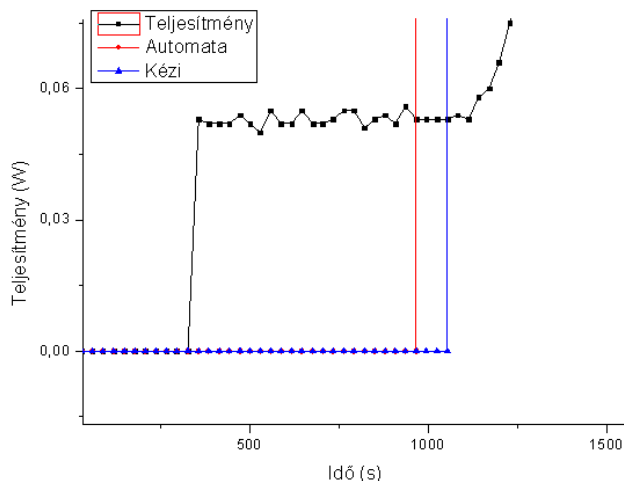
Neutronforrás használata azért szükséges, hogy beindítsuk a láncreakciót, illetve mert a reaktor teljesítményét meghatározó mérőláncok felhasználják, hogy a teljesítmény arányos a reaktortérbeli neutronfluxussal. Kis neutronfluxusnál pedig a statisztikus ingadozások nagyok lehetnek (egyszer egy neutron jön a detektorban, míg a következő mérés időpontjában kettő), amitől a mérőlánc úgy érzékelhetné, hogy hirtelen megugrott a reaktor teljesítménye, és vészleállítást végezne. Ezt elkerülendő berakunk egy PuBe forrást, ami már kezdetben is nagy fluxus ad (ahhoz mindenképpen elég nagyot, hogy a statisztikus ingadozások hatását lecsökkentsük), valamint gyorsítja a megfelelő teljesítményszint elérését. Nagy teljesítményen praktikus a forrást kiemelni a reaktortérből, ugyanis egyrészt a funkciója szempontjából feleslegessé válik (a statisztikus ingadozás relatíve kisebb nagy neutronszámok esetén), másrészt nagy fluxus esetén már több neutront nyel el, mint bocsát ki, így nem érdemes benn hagyni (ökölszabály: 1 W-os teljesítménynél emeljük ki).

Itt ragadjuk meg arra az alkalmat, hogy megjegyezzük a mérőláncoknál két fontos szempont van: a redundancia (minden releváns mennyiséget legalább két független műszer mérjen), és a diverzitás (ha egy fajta műszer meghibásodik valamilyen ok miatt, a másik elven dolgozó még folytassa működését, ezzel tehát kizárjuk a közös okú meghibásodást).

Először megmértük a biztonságvédelmi rudak esési idejét, azaz hogy vészleállítás esetén mennyi idő alatt jutnak be a reaktortérbe, ezeket rendre $t_{\text{esési}}(\text{BV1}) = 442 \text{ ms}$, $t_{\text{esési}}(\text{BV2}) = 332 \text{ ms}$. Természetesen erre is vannak maximális korlát értékek (500 ms), de mindkettő azokon belülnek adódott, tehát megkezdhettük a reaktorindítást.

A már említettek szerint reaktortérbe elsőként leeresztettük a neutronforrást, majd egyenként felhúztuk a két BV rudat (egyszerre a kettőt nem engedte az automatika, bizonyos itt nem részletezendő okok miatt, valamint ha egyszerre nyomjuk a fel és a le gombot, akkor a rudakat a biztonságos irányba azaz csak lefele ereszti). Az ekkor

tapasztaltakat az 1. ábra mutatja, ahol jól látható, hogy a beeresztett neutronforrás egy kis (pár század W-os) teljesítményként tükröződik a mérőláncokon, mivel azok a megbeszéltek szerint a teljesítményt neutronfluxusból határozzák meg (az ábrán ez a plató, még a kézi és automata rudak kihúzása előtt).

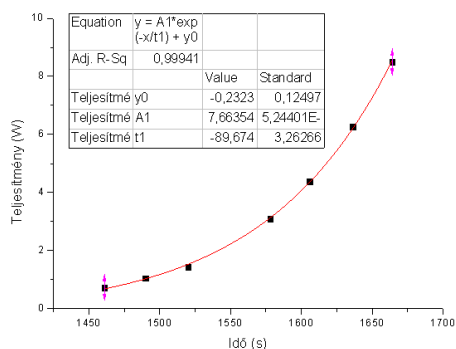


1. ábra A reaktor teljesítménye (W-ban) beindításkor

Ezek után a kézi (B_4C), illetve az automata (kadmiumozott acél) rúd (amelyet át lehetett kapcsolni kézi vezérlésű üzemmódra) megemelésével elkezdtük növelni a reaktor teljesítményét (első ábra végén a felfutó szakasz ennek a kezdete, valamint a 2. ábra exponenciális része). Első alkalommal a kézit felhúztuk egy a laborvezető által javasolt értékig, majd az automatát is (420, 420-as állásokig mindkettőt), majd mikor elértük a kívánt teljesítmény tartományt (10 W) az automata szabályzást bekapcsoltuk. Közben a teljesítményményt W-ban mutató mérőlánc segítségével, az exponenciális felfutó szakaszon mértünk egy kétszerezési időt (amíg a neutronfluxus duplájára, azaz mivel ez egyenesen arányos a teljesítménnyel, ezért a teljesítmény duplájára nő). Ez $T_{2x} = 86$ s-nak adódott. A második ábrán látható exponenciális teljesítménynövekedésre görbét illesztve megállapítható a periódusidő, tudván, hogy a neutronok számára a következő összefüggés érvényes:

$$n(t) = n_0 \cdot e^{\lambda T}$$

ahol $n(0)$ a kezdeti neutronszám ($t = 0$ -ban), t az eltelt idő, T pedig a keresett periódusidő. Ebből meghatározható a kétszerezési idő is, lévén a periódusidő az, amíg a neutronok száma (és így a teljesítmény, amivel ez arányos) e -ad részére nő, míg a kétszerezési idő, amíg duplájára, tehát $T_{2x} = T \cdot \ln 2$. Ez $T_{\text{periódus}} = (89,6 \pm 3,3)$ s, ezt az illesztést mutatja a 2. ábra. (volt 1 kiszóró pontunk, ezt figyelmen kívül hagytuk).



2. ábra A reaktor periódusidejének meghatározása 10 W-ig

$$T_{2x, \text{mért}} = 86 \text{ s}$$

$$T_{2x, \text{számolt}} = (60,1 \pm 2,3) \text{ s}$$

$$T_{\text{periódus}} = (89,6 \pm 3,3)$$

Látható, hogy a 86 s mint mért kétszerezési idő nem stimmel, a mért értékekhez, s mivel a teljesítmény értékeket számítógép vette fel, ezért valószínűsíthető, hogy emberi tényező okozta a hibát, azaz aki épp a 2x-ési időt mérte, az valamit elrontott (később állította le). Mert az illesztésről is szinte szemre leolvasható kétszerezési idő ~60 s.

Ekkor a reaktor tartotta az épp aktuális teljesítményt (azaz a reaktor kritikussá vált, és az automatika tartotta fenn ezt az állapotot), amit úgy ért el, hogy a szuperkritikus reaktortérbe lejjebb engedte az automata szabályzó rudat (továbbiakban AR). A kritikus állapotban leolvastuk mennyire voltak felhúzva az egyes szabályzórudak (mm-ben), illetve az I_1 , I_2 impulzus üzemű mérőláncok állapotát. Továbbiakban a beütésszámot pps-el jelöljük (particle per secundum):

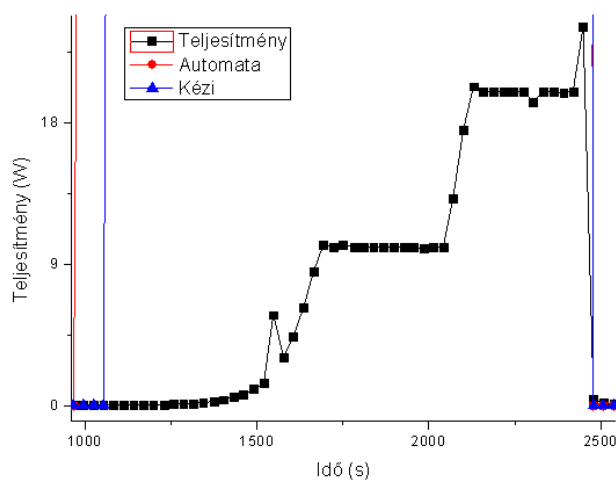
Automata rúd: 366 mm

Kézi rúd: 420 mm

$I_1 = 3 \cdot 10^4$ pps

$I_2 = 3 \cdot 10^4$ pps

Ezek után a 10 W-os platóról felmentünk 20 W teljesítményig (automata szabályzás kikapcsol, rúd felhúz, majd amikor elértük a 20 W-ot automata visszakapcsol rutinnal), a két platót, valamint a felfutásokat mutatja a 3. ábra:



3. ábra A reaktor teljesítménye 10 W és 20 W-os üzemeltetés során

Hasonlóan az előzőhöz az automata szabályozás bekapcsolása után a rudak állapotát valamint, az impulzusüzemű mérőláncok által kijelzett értékeket lejegyeztük, ezek:

Automata rúd: 367 mm

Kézi rúd: 420 mm

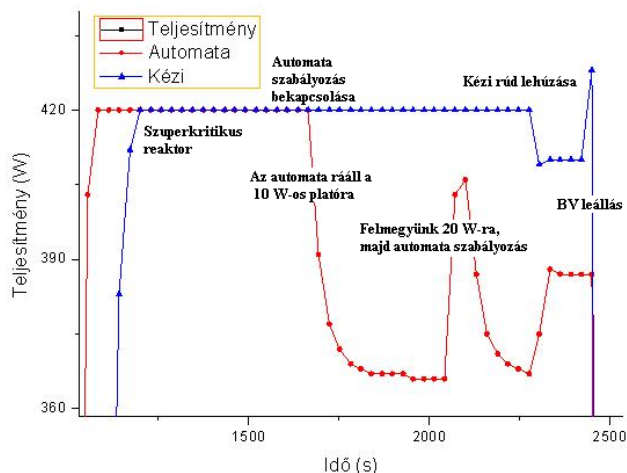
$I_1 = 7 \cdot 10^4$ pps

$I_2 = 8 \cdot 10^4$ pps

Látszik ebből, hogy itt bár a teljesítmény pontosan 2x-esére nőtt ($10 \text{ W} \Rightarrow 20 \text{ W}$) az impulzusüzemű láncok által kijelzett értékek valamivel többet nőttek ($3 \cdot 10^4 \text{ pps} \Rightarrow 7 - 8 \cdot 10^4 \text{ pps}$), tehát itt még tűrhetően mérnek, de már nem precízek, csak tájékozási jelleggel használható (ököl szabály: 10 W-ig érdemes használni őket). Majd a kézi rudat lehúztuk 410 mm-re, az automatika pedig a kritikus állapot fenntartása érdekében felhúzta az AR-t 388 mm-re, ebből látható, hogy a kézi rúd által elnyelt reaktivitás kétszerese a AR-ének (a kézi betolására 10-el, az automata 21-el való kiemelésével reagált a rendszer).

A reaktivitás tartaléka a reaktornak meghatározható a rúdértékesség görbékből. Ezek a görbék azt adják meg hogy adott kiemelési szinthez mekkora elnyelt reaktivitás tartozik, amelyre elsőre azt várnánk hogy lineárisak lennének. Ez azért nem teljesül mert a legalsó állásban a rudak „túllógnak” a pálcákon (a pálcák hasadóanyag tartalma magasabban kezdődik mint a rudak legalsó helyzete), míg a felső állásoknál pedig a pálcák hasadóanyag tartalmán túl lehet húzni a rudakat (teljesen kihúzott állapot). Így a görbét egy koszinuszos jellegű alakítószó szabja meg, de a középső (általunk vizsgált) tartományban a rúdértékesség görbe jó közelítéssel lineáris. A görbék adatait tartalmazó táblázatból leolvasható az adott kiemeléshez tartozó reaktivitásokat

összeadva, kiszámítottuk hogy a reaktor reaktivástartaléka 82 cent, ami azt jelenti, hogy prompt kritikussá sosem válhatna. A leállítást végül a biztonságvédelmi gomb megnyomásával hajtottuk végre, aminek hatására belövdnek a BV rudak, a reaktor azonnal szubkritikus lesz, majd leáll. Az általunk leírtakat és a fent tapasztaltakat a 4. ábra foglalja össze.



4. ábra Rudak helyzete a reaktorban 10 W-20 W-os üzemeltetés közben

Jól látható a 3. és 4. ábrát összevetve amint a reaktor az automata szabályozás bekapcsolásakor picit visszavéve az épp aktuális teljesítményből, rááll egy konstans értékre, és azt az automatika tartja a mérés során (a kialakult plató), majd a biztonságvédelmi (ez nincs az ábrákon) és szabályzó rudak belövése után hirtelen leesik a teljesítmény. (Érdekes megjegyeznünk, hogy a BV leállítás során E4 túlfutott 120 %-on, emiatt transziens jel léphetett fel az elektronikában (I_2), nincs technikai jelentősége a mérés szempontjából.)

C) Reaktor közepes teljesítményű üzemeltetése (1 kW)

Ebben a részben első feladatunk a 1 kW-os teljesítmény elérése volt, ami hasonlóan zajlott az előző részben leírtakhoz így azt nem ismételjük meg (lásd ott). 1 kW-os teljesítményen automata szabályozásra kapcsolunk, ahol leolvastuk a rúdhelyzeteket és az impulzus üzemű mérőláncok állapotát, valamint útközben stopperrel újra mértünk E4 mérőlánc segítségével kétszerési időt is:

Automata rúd: 352 mm

Kézi rúd: 430 mm

$I_1 = 7 \cdot 10^5$ pps

$I_2 = 1,1 \cdot 10^6$ pps

$T_{2x, \text{mért}} = 31$ s

$T_{2x, \text{számolt}} = (31,2 \pm 0,5)$ s

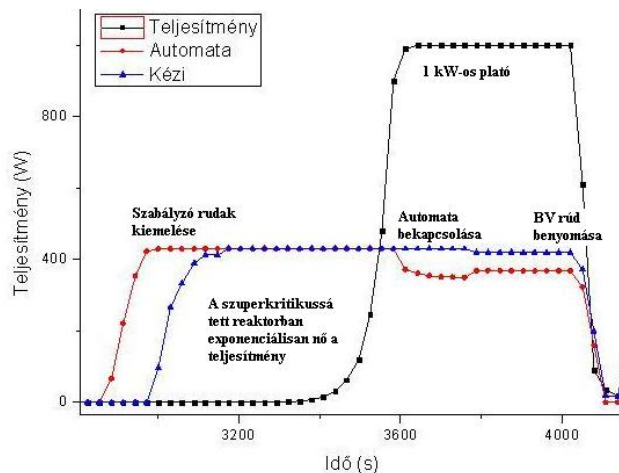
$T_{\text{periódus}} = (45,0 \pm 0,7)$ s

Látszik ebből, hogy itt bár a teljesítmény pontosan 100x-osára nőtt ($10 \text{ W} \Rightarrow 1000 \text{ W}$) az impulzusüzemű láncok által kijelzett értékek viszont csak ~10-20x-osra nőttek ($3 \cdot 10^4 \text{ pps} \Rightarrow 7 \cdot 10^5 \text{ pps}$). Tehát ilyen teljesítményeken már nem használhatóak az I_1 , I_2 impulzusüzemű láncok által szolgáltatott információk, annyira gyakoriak a beütések, itt a releváns adatokat az egyenáramú (integráló) láncok adják. Ezt tudta a reaktor kiértékelő rendszerének a tervezője is, ezért a logika nem engedi érvényre jutni 200 W teljesítmény felett ezen láncok biztonságvédelmi jeleit, ezért akármilyen jel is érkezik be ezekről a reaktor nem áll le (csak figyelmeztetés jön). Valamint vegyük észre a szabályzó rudak állásai is némileg módosultak. Tudjuk, hogy a kézirúd értékessége az automatáénak a duplája. Így a korábbi K: 420, A: 368 helyett, most K: 430, A: 352 van, ami egy kihúzottabb állapotnak felel meg (ha a kézit 420-ra tolnánk az automata ~373-ra emelkedne, hogy kompenzáljon). Ez a negatív visszacsatolás miatt alakul ki: a Doppler elnyelés szélesedik (tehát több neutron nyelődik el), ezt kompenzálja az automatika. A fentieket (rúdhelyzetek-teljesítmény) mutatja az 5. ábra, valamint a periódusidő meghatározásához szükséges illesztést a 6. ábra.

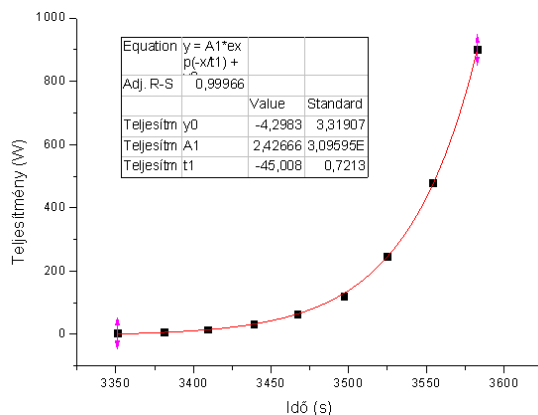
Megjegyzés [Sz. Á.1]: Szigi, Szigi Szigi. Mégegyszer. :D
A BV leállást a mérőlánc váltotta ki, nem kézzel lett belöve. Az E4 mérőláncot hagytátok túlfutni (ergo 120% felé menni) ez állította le a reaktort. Pont.

És igen itt érdekes megjegyezni, hogy az I2-ben volt egy transziens jel utána stb. Bocsi, hogy szörözők, a jegybe nem fog beleszámítani.

Most a BV rudak közül az egyik kicsit lejjebb tolásával a szabályzó rudak azonnal leesnek a reaktortérbe, s így állítottuk le a láncreakciót. Az ábrán is jól kivehető ez a szakasz, valamint érdemes megjegyezni, hogy a szabályzó rudak maximális kiemelése után már egész biztosan szuperkritikus a reaktor (nem tudjuk pontosan hol lépi át a küszöböt ezekkel a műszerekkel), a teljesítmény csak azért tűnik „állandónak”, mert az ottani értékekhez képest nagy skálán nézzük, tulajdonképp ott is ugyanúgy exponenciálisan növekszik.



5. ábra Szabályzó rudak helyzete és a teljesítmény 1 kW-ig tartó üzemeltetés közben

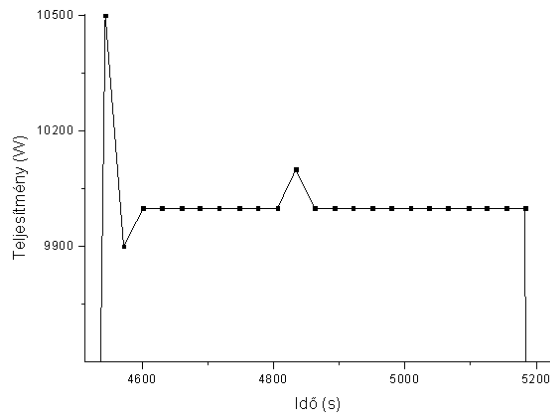


6. ábra A periódusidő meghatározása 1 kW-ig

D) Reaktor nagy teljesítményű üzemeltetése (10 kW)

Itt már nem telt el sok idő az operátor váltás miatt, így felhasználhattuk az előző működés következtében keletkező késő neutronokat (β -bomlás után a magból kilépve, mivel a β -bomlás nagyobb ciklusidővel rendelkezik, ezért „késnek” a neutronok). Megfelelően nagy volt még a neutronfluxus, így nem kellett újra leeresztenünk a forrást, nyomban kezdhettük a szabályzó rudak felhúzásával (ugye a BV-t csak egy picit engedtük be, hogy a szabályzók leessenek). Minden egyébben az előző (lásd B rész) indításokhoz hasonló volt a mostani is (itt a szabályzó rudakat 440-440-es állásokig húztuk fel, s így tettük szuperkritikussá a láncreakciót). A reaktort azonban most hagytuk tovább szaladni 10 kW elérése után aktiváltuk az automata szabályozó rendszert, hogy pontosak legyünk (s ez az ábrán látszik is) némileg túlcúsztunk ezen a teljesítményen, majd kézzel állítottuk vissza a 10 kW-os teljesítményt. Ezt a szakaszt (túlszaladás utáni beállítást, majd a 10 kW-os platón való automata szabályozást) mutatja a 7. ábra. Itt is meghatároztuk az autoszabályozás esetén a rudak helyzetét, valamint még a felfutási szakaszon stopperrel mértünk 2x-ezési időt (duplán), s az előzőekkel analóg módon illesztéssel meghatároztuk a periódusidőt is, amiből egy számolt 2x-ezési időt is alkottunk. Természetesen mint már a C) részben beláttuk, itt semmi értelme nincs már az impulzusüzemű műszerek által

mutatott értékeknek, így nem fárasztottuk magunkat azzal hogy feljegyezzük őket. Jól látható, hogy a már említett Doppler hatás itt még erősebb, a szabályozó rudakat az automatika a negatív visszacsatolás (melegszik a moderátor + üzemanyag is) miatt még feljebb húzta a kritikus állapot fenntartásához.



7. ábra A reaktor teljesítménye 10 kW-os üzemeltetésnél

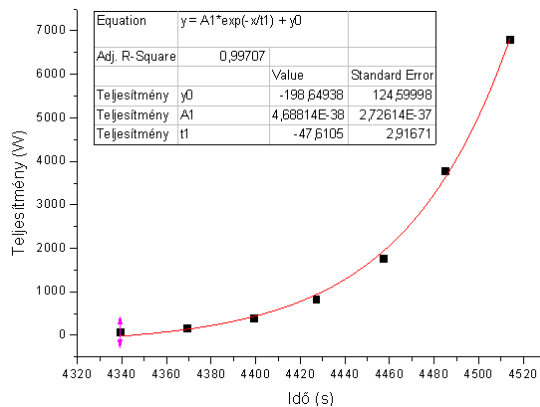
Automata rúd: 389 mm

Kézi rúd: 420 mm

$T_{2x, \text{mért}} = 25$ s illetve 26 s

$T_{2x, \text{számolt}} = (33,0 \pm 2,0)$ s

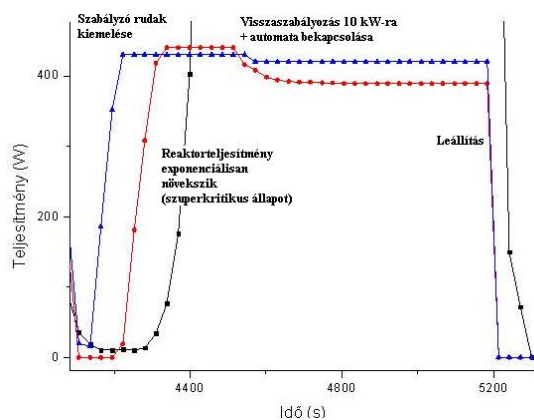
$T_{\text{periódus}} = (47,6 \pm 2,9)$ s



8. ábra A periódusidő meghatározása 10 kW-ig

Látható, hogy itt nem kapjuk vissza egészen pontosan a mért periódusidőt az illesztésből számolttal (hibával együtt 26 s vs 31 s). Érdekes az illesztésből számoltat figyelembe venni ebben az esetben, mert a mért 2x-ési idő bizonytalansága (meniszkusz pontos meghatározásától, a stopper pont akkor megnyomása, amikor szemre 2x akkora a teljesítmény), főleg minél rövidebb ez az idő, annál nagyobb. A szabályozó rudak állását üzemeltetés közben mutatja a 9. ábra.

Automata üzemeltetés alatt belenéztek a reaktortérben, ahol megfigyelhették a fellépő Cserenkov-sugárzást, ami igen szép kék fény formájában jelentkezett. Végül a BV gombbal állítottuk le utoljára a reaktort, aminek hatására mind a BV mint a szabályozórúdak beesnek a reaktortérbe, s leáll a láncreakció.



9. ábra Szabályzó rudak helyzete és a teljesítmény 10 kW-ig tartó üzemeltetés közben

IV. Összegzés

Bepillantást nyerhetünk egy tanreaktor mindennapi életében, és megtapasztalhattuk a működésének összetettségét, amely túlnyúlt a mérés keretein, hiszen egy a reaktorról való megismerkedésnek több olyan dolog is része volt, amit szervesen a kiértékeléseknél (kapszulák szállításától, egészen az ioncserélt víz használatáig, és tisztítási módszereiig) nem használtunk fel, ám úgy éreztük egy fizikusnak azért illik tudnia ezekről is.