

Szegedi Tudományegyetem  
Természettudományi Kar

## **Reaktivitás on-line digitális mérhetősége virtuális méréstechnikával**

**TDK dolgozat**

**Készítette: Bara Péter**

fizikus szakos hallgató

IV-V. évfolyam

Témavezető: Dr. Korpás Lajos, csoportvezető reaktorfizikus, Paksi Atomerőmű Rt.

Konzulensek: Dr. Fehér Sándor, egyetemi docens, BME Nukleáris Technikai Intézet

Dr. Török Miklós, egyetemi docens, SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

Szeged, 2000.

## **Bevezetés:**

A nukleáris reaktorok dinamikáját a reaktivitás határozza meg. A blokkindítási mérések is csaknem kizárólag különféle reaktivitás-paraméterek vizsgálatát jelentik. A reaktivitás közvetlenül nem mérhető, a neutronfluxus alapján sokparaméteres differenciálegyenlettel számítható.

Az indítási mérések alatt szükséges az on-line reaktivitás-meghatározás is. A korábban csak analóg berendezésekkel volt lehetséges, vagy digitális berendezéssel, erősen egyszerűsített modell alapján, amely csak kisebb pontosság elérését tette lehetővé, mint az off-line modell. A mai mérés- és számítástechnika lehetővé teszi a pontosabb és megbízhatóbb reaktivitásmérést.

TDK dolgozatomban megvizsgálom a Paksi Atomerőműben a jelenlegi analóg berendezés helyettesíthetőségét egy PC alapú virtuális műszerrel. Vizsgálom a mérési láncot zaj és átvitel szempontjából, meghatározom a szükséges analóg előtagokat, különös tekintettel a környezetből adódó technológiai és fizikai zajokra. Meghatározom a szükséges mintavételezési paramétereket. Rámutatok a további technikai fejlesztési lehetőségekre, valamint azok reaktorfizikai aspektusaira is, valamint bizonyos új kutatási eredmények alkalmazhatóságára a reaktivitásmérésben.

## A transzport-egyenlet:

A nukleáris reaktorokban a folyamatokat elsősorban a neutronter határozza meg. A neutronter leírására a transzport-egyenlet alkalmas.

A transzport-egyenlet differenciális alakja a következő:

$$(1) \quad \frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t)}{\partial t} = -\boldsymbol{\Omega} \text{grad } \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t) - \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t) + Q(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t)$$

ahol  $\Phi$  a neutronfluxus,  $v$  a neutronsebesség,  $t$  az idő,  $E$  az energia,  $\boldsymbol{\Omega}$  a térszög,  $\mathbf{r}$  a hely,  $\Sigma_t$  a magreakciók teljes hatáskeresztmetszete.

A jobboldal első tagja a nettó kifolyást, a második a magreakciók által összesen elnyelt neutronokat, a harmadik pedig a forrásokat írja le. A transzport-egyenlet levezetése és bővebb értelmezése megtalálható [1]-ben.

A transzport-egyenlet megfelelően leírja a neutronteret, sajnos azonban igen nehezen megoldható. Analitikus megoldása csak néhány egészen egyszerű esetre ismert, gyakorlati problémák megoldására pedig még numerikus módszerek használatával sem alkalmas, mert a sokféle anyagi minőségű alkatrészekből felépülő, bonyolult geometriájú reaktorokban kilátástalanul bonyolult algebrai problémává válik, amelyet még nagy teljesítményű számítógépek segítségével sem lehet belátható idő alatt megoldani.

A transzport-egyenletnek ismeretes integrális alakja is:

$$(2) \quad \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t) = \int_{-\infty}^s \exp\left(-\overline{\Sigma_t(s' \rightarrow s)}\right) \cdot Q\left(\mathbf{r}_0 + s' \boldsymbol{\Omega}, E, \boldsymbol{\Omega}, t_0 + \frac{s'}{v}\right) ds'$$

amelyet néhány numerikus módszer esetében felhasználnak, de időfüggő problémák kezelésére így sem alkalmas, ezért közelítéseket használnak. A reaktorkinetikai problémák esetén a pontkinetikai egyenletrendszert alkalmazzák.

## A pontkinetikai egyenletrendszer

A pontkinetikai egyenletrendszer a transzport-egyenletből származtatható a térfüggő effektusok egy részének elhanyagolásával, valamint a neutronok energia szerint egyetlen csoportba történő összevonásával. Ezen okok miatt a pontkinetikai egyenletrendszer erősen közelítő jellegű, azonban rövid időtartamú változások leírására jó pontossággal használható.

A pontkinetikai egyenletrendszer figyelembe veszi, hogy a hasadásban keletkező neutronok egy része nem a hasadás pillanatában, – azaz prompt –, hanem csak késve jelenik meg. A késő neutronok hányadát  $\beta$ -val jelöljük. A késő neutronokat bizonyos hasadási termékek bocsátják ki, amelyek közül több mint 60 későneutron-anyamagot sikerült azonosítani. Nincs azonban szükség arra, hogy mindegyiket külön-külön számba vegyünk. A gyakorlatban elégséges az anyamagokat 6 csoportba osztani, és mindegyik csoporthoz egy  $\beta_i$  részhányadot és egy átlagos  $\lambda_i$  bomlási állandót rendelni.

Alakja a következő:

$$(3) \quad \frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D \Delta \Phi(\mathbf{r}, t) - \Sigma_a \Phi(\mathbf{r}, t) + v \Sigma_f (1 - \beta) \Phi(\mathbf{r}, t) + S(\mathbf{r}, t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(\mathbf{r}, t),$$

$$(4) \quad \frac{\partial C_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -\lambda_i C_i(\mathbf{r}, t) + \beta_i v \Sigma_f \Phi(\mathbf{r}, t) \quad (i = 1, 2, \dots, 6).$$

ahol  $C$  a későneutron-anyamagok koncentrációja, az  $i$  index pedig az egyes későneutron csoportok jelzésére szolgál.

A pontkinetikai egyenletrendszer levezetése megtalálható [1]-ben.

## A reaktivitás

A reaktorok neutronfluxus változását, és ezen keresztül a termikus teljesítmény változását a reaktivitás ( $\rho$ ) jellemzi.

Definíció szerint:

$$(5) \quad \rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} = 1 - \frac{1}{k_{\text{eff}}}$$

ahol  $k_{\text{eff}}$  az effektív sokszorozási tényező, amely azt adja meg, hogy egy neutron élettartama során átlagosan hány neutront kelt. Az effektív sokszorozási tényező egzaktul a diffúzióelmélet alapján értelmezhető, amely tárgyalása megtalálható [1]-ben. Mivel kritikus reaktorokban  $k_{\text{eff}} = 1$ , ezért szuperkritikus reaktorban  $\rho > 0$  és  $k_{\text{eff}} > 1$ , szubkritikus reaktorban  $\rho < 0$  és  $k_{\text{eff}} < 1$ .

Ha a pontkinetikai egyenletrendszer megoldását keressük a

$$(6) \quad \varphi(t) = \varphi_0 e^{\omega t}$$

$$(7) \quad C_i(t) = C_{i0} e^{\omega t}$$

alakban ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ), akkor azt kapjuk, hogy az egyenletnek csak akkor van nem-triviális megoldása, ha  $\omega$  kielégíti a

$$(8) \quad \frac{\rho}{\beta} = \frac{\Lambda}{\beta} \omega + \omega \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i / \beta}{\lambda_i + \omega} \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

egyenletet, amelyet reciprokóra-egyenletnek nevezünk, valamint az együtthatók között pedig fennáll, hogy

$$(9) \quad C_{i0} = \frac{\beta_i \varphi_0 / \Lambda}{\lambda_i + \omega} \quad (i = 1, 2, \dots, 6).$$

Általános megoldása:

$$(10) \quad \varphi(t) = \sum_{j=0}^6 \varphi_j e^{\omega_j t} \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$(11) \quad C_i(t) = \sum_{j=0}^6 C_{ij} e^{\omega_j t} \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

Szuperkritikus állapotban  $\omega_0$  pozitív, a többi gyök negatív; szubkritikus állapotban pedig mindegyik gyök negatív. Ebből következik, hogy szuperkritikus állapotban elegendően hosszú idő elteltével csak az  $\omega_0$ -nak megfelelő, exponenciálisan növekvő tag marad meg:

$$(12) \quad \varphi(t) \approx \varphi_0 e^{\omega_0 t}$$

Az  $\omega_0$  frekvencia szoros kapcsolatban áll a  $T_{2x}$  kétszerezési idővel:

$$(13) \quad \omega_0 = \frac{\ln 2}{T_{2x}} = \frac{0,69}{T_{2x}}.$$

A  $T_{2x}$  kétszerezési idő kísérletileg jól mérhető. Ha  $\omega_0$ -at mérjük, a  $\rho$  reaktivitást kiszámíthatjuk.

A reciprokóra-egyenlet alkalmazásához számított mennyiségekre van szükség. Ilyen a  $\Lambda$  generációs idő, és a  $\beta$ ,  $\beta_i$  későneutron-hányadok is, mert a késő neutronok kisebb energiával keletkeznek, mint a prompt neutronok, és ezért rájuk vonatkozóan a kiszökési valószínűség kisebb, tehát a láncreakció számára értékesebbek, ezért nem a magfizikából ismert értékeket kell használni, hanem azoknál általában nagyobb, effektív értékeket. A számított értékek bizonytalanságait kiküszöbölhetjük, ha a reciprokóra-egyenlet mindkét oldalát  $\beta$ -val osztjuk, vagyis a reaktivitást az effektív későneutron-hányad egységeiben fejezzük ki. A  $\Lambda/\beta$  hányados kísérletileg meghatározható. Az effektív későneutron-hányadot, mint a reaktivitás egységét dollárnak nevezzük, századrésze a cent. Az elnevezésnek történeti okai vannak. Ha a reaktivitást dollárban mérjük a  $\rho/\beta = 1$  dollár reaktivitás a reaktorok biztonságára vonatkozóan fontos határ. Az 1 dollárnál lényegesen kisebb reaktivitásokra a kétszerezési idő 10 s és 100 s közé esik. 1 dollár környékén viszont gyorsan csökken, és könnyen 0,01 s alatti értéket vehet fel. Azt a reaktort, amelyik ilyen gyorsan növeli a teljesítményét, gyakorlatilag lehetetlen technikai eszközökkel szabályozni, mert ezen eszközök működési ideje legalább néhányszor 0,1 s, ezért a reaktorok üzemét úgy korlátozzák, hogy benne 20 s-nál rövidebb kétszerezési idők ne léphessenek fel, azaz reciprokóra egyenletek alapján a reaktivitás 0,2 dollárnál ne legyen nagyobb.

Részletesebb adatok [1]-ben találhatóak.

## A reaktivitás felhasználása

A reaktivitás minden reaktor kinetikai számításban és mérésben fontos érték. A beavatkozó eszközök, a biztonsági paraméterek jellemzésére, egyaránt használják, valamint igen sok reaktorfizikai mennyiség a reaktivitás megváltozását fejezi ki valamilyen egyéb mennyiség függvényében.

Dolgozatomban a blokk újraindítások során alkalmazott reaktivitásmérésekkel foglalkozom. A fűtőelem feltöltés tervezése során a rendelkezésre álló fűtőelem adatok felhasználásával, numerikus modellek segítségével meghatározzák a következő kampány töltetének elrendezését, átrakási tervét és a kampányra vonatkozó reaktorfizikai paramétereket, melyek többsége reaktivitás-paraméter. A paraméterek hitelesítését hajtják végre az indítási mérések során, miután a reaktor üzemkész, de még az energetikai indítás előtt.

A számítási algoritmusok pontossága ellenére a reaktorfizikai indítási mérések szolgáltatják az első, mérésen alapuló reaktorfizikai adatokat az új töltetről. A pontos indítási mérések valószínűsíthetik az esetleges helytelen zóna betöltést, így a hiba kijavítható a blokk felterhelése előtt.

A blokkokra elvégzett Biztonsági Analízisek csak bizonyos reaktivitás paraméterek esetén érvényesek. A számolt paramétereknek és a mért paramétereknek egy adott hibahatáron belül meg kell egyezni, ekkor biztosítható, hogy az esetleges üzemzavarok a Biztonsági Analíziseknek megfelelően menjenek végbe.

A mérési program lépései:

- A Minimális Effektív Teljesítmény elérése, a kritikus bórsavkoncentráció meghatározása. A Minimális Effektív Teljesítmény feltétele a reaktor kritikus volta, azaz a reaktivitásnak a hibahatáron belül zérusnak kell lennie.
- Az szabályzó és biztonságvédelmi rúd hajtások összekapcsoltságának ellenőrzése. E mérés során a rudakat egyenként mozgatják, és ellenőrzik az okozott reaktivitásváltozást.
- A  $dp/dT$  mérése a primer kör felmelegítése során, azaz mérik a reaktivitás változását a hőmérséklet függvényében.

- Az üzemzavari védelem hatékonyságának ellenőrzése az összes SZBV csoport együttes ejtésekor, kazetta „fennakadását” szimulálva. Ez esetben az összes reaktivitás változást határozzák meg, a mért fluxusgörbe alapján helyben, de a mérés után teszik meg.
- A  $dp/dh$  meghatározása, azaz mérik a reaktivitás változását a rúdhelyzet függvényében.
- A  $dp/dC_B$  meghatározása, azaz mérik a reaktivitás változását a bórsav koncentrációjának függvényében.
- Hőmérő kalibráció, valamint a zóna fluxus és teljesítmény szimmetriáinak ellenőrzése, amely mérésekhez nem szükséges reaktivitásmérés.

Mint a fentiekből látható a méréssorozat elemeinek többsége reaktivitásmérésen alapszik. A rúdejtés kivételével a többi on-line reaktivitásmérést igényel.



## A reaktivitás mérése

A reaktivitás közvetlenül nem mérhető mennyiség. A reaktivitásmérésnek sok módszere ismeretes, amelyek általában a pontkinetikai egyenlet speciális körülmények között való közelítő megoldásain alapulnak. Ezen módszerek azonban csak nehézkesen alkalmazhatóak energetikai reaktorokban, mert két állandósult állapot közötti különbségen alapulnak, és a késő neutronok miatt a fluxus csökkenése csak lelassul, de állandó értékről nem beszélhetünk, így nehezen mérhető a két állapot közötti átmeneti idő.

A fenti problémák kiküszöbölésére keletkezett az inverz kinetika módszere, amely azonban valamely számító berendezés csatlakoztatását igényli a reaktorhoz. Az inverz kinetika módszerének lényege a következő: egy neutrondetektorral az idő függvényében mérjük a fluxust ( $\varphi(t)$ ), és keressük azt a reaktivitást ( $\rho$ ), amely mellett a mért függvény éppen a pontkinetikai egyenlet megoldása.

A későneutron anyagok számát kifejezve, a pontkinetikai egyenletekből a következőt kaphatjuk:

$$(14) \quad \frac{\rho(t)}{\beta} = 1 + \frac{\Lambda \frac{d\varphi(t)}{dt} - \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\beta} \int_{-\infty}^t \varphi(t') e^{-\lambda_i(t-t')} dt'}{\varphi(t)}$$

A korszerű mérés technikában a leggyakrabban használt neutrondetektorok ionizációs vagy hasadási kamrák, amelyek az időegység alatt detektált neutronok számával arányos áramjelet adnak ki. Kis fluxus esetén az impulzusdetektorok jelét integrálják, így szintén áramjelet kapnak.

Az inverz kinetika számítási módszere a gyakorlatban a következő:

Írjuk fel a pontkinetikai egyenleteket a következő, Nordheim egyenleteknek nevezett módon:

$$(15) \quad \frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \sum_i \lambda_i C_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$(16) \quad \frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i C_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

ahol  $n$  a térben és időben integrált neutronfluxus.

Vezessük be a következő új változókat:

$$(17) \quad n \cdot w \cdot \tau = N$$

$$(18) \quad C_i \cdot \frac{\Lambda \cdot w \cdot \tau}{\beta} = C'_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$(19) \quad \frac{\beta_i}{\beta} = \beta'_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$(20) \quad \frac{\rho}{\beta} = \rho'$$

ahol  $w$  a neutronbdektornak az integrális neutronfluxusra vonatkozó hatásfoka, az elhelyezés figyelembe vételével,  $\tau$  pedig két mérés között letelt idő.

Ekkor  $\rho'$  a dollárban mért reaktivitás,  $N$  a mért beütésszám vagy áram lesz,  $\beta'_i$  az  $i$ -ik későneutroncsoport aránya az összes neutroncsoporthoz.

Ekkor a következő egyenleteket kapjuk:

$$(21) \quad \frac{\Lambda}{\beta} \cdot \frac{dN}{dt} = N(\rho' - 1) + \sum_i \lambda_i C'_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$(22) \quad \frac{dC'_i}{dt} = \beta'_i N - \lambda_i C'_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

Integrálás,  $\rho$  kifejezése és differenciaegyenletre való áttérés után:

$$(23) \quad \rho' = \frac{\frac{\Lambda}{\beta}(N_j - N_{j-1}) + \sum_i (C'_{i,j} - C'_{i,j-1})}{\frac{N_{j-1} + N_j}{2} \cdot \tau} \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$(24) \quad C'_{i,j} = C'_{i,j-1} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \tau) + N_{j-1} \cdot \frac{\beta'_i}{\lambda_i} \cdot \left( \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot \tau)}{\lambda_i \cdot \tau} - \exp(-\lambda_i \cdot \tau) \right) + N_j \cdot \frac{\beta'_i}{\lambda_i} \cdot \left( \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot \tau)}{\lambda_i \cdot \tau} - \exp(-\lambda_i \cdot \tau) \right)$$

ahol  $(i = 1, 2, \dots, 6)$  és a  $j$  index pedig egy adatsorozat egymás utáni elemeinek jelölésére szolgál.

(23) és (24) már alkalmas a reaktivitás számítására.

## **A reaktivitásmérések hibaforrásai**

A reaktivitásmérések természetesen bizonyos hibákkal terhelték. Dolgozatom elsődleges célja, hogy rámutasson e hibák csökkentésének néhány lehetőségére, elsősorban a Paksi Atomerőmű kapcsán. Szükséges megemlíteni, hogy elméletben maga a reaktivitás sem tökéletes jellemző mennyisége a reaktor kinetikájának, hiszen már a definíció is tartalmaz néhány közelítést, ám a gyakorlatban – különösen energetikai reaktorok esetében – minden szempontból megfelelő mennyiség.

A reaktivitásmérések hibái a következő okokra vezethetőek vissza:

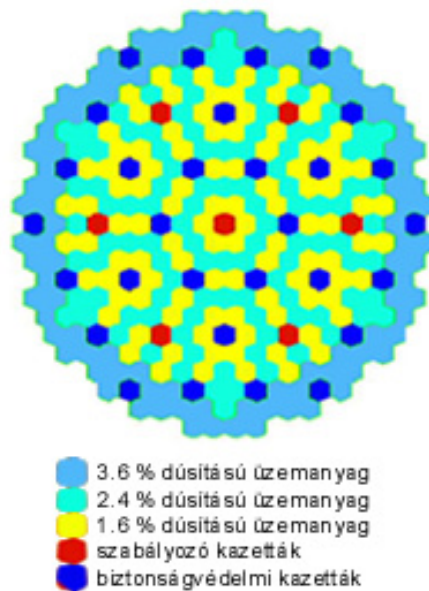
1. Az aktív zónában a neutronfluxus sztohasztikus ingadozása és a térfüggő effektusok.
2. A mérőelemek hibái, valamint ezek elhelyezkedéséből adódó hibák.
3. A mérési technológiából adódó hibák és zajok.
4. A pontkinetikai egyenletrendszer és az inverz kinetika módszerének elhanyagolásából származó hibák.

Dolgozatomban elsősorban a 3. pont szerinti hibaforrásokkal foglalkozom, de ahol a kapcsolat miatt szükséges megemlítem az egyéb hibaforrásokat is.

Különösen fontos megjegyezni, hogy a ma alkalmazott mérési technológia is kielégíti az igen szigorú biztonsági követelményeket. A mérés további pontosítása azonban nem csak a gazdaságosság növelését teszi lehetővé, de elősegíti az különféle reaktorfizikai számítások kidolgozását és ellenőrzését.

## Az aktív zóna

Maga a reaktor aktív zónája a mérési lánc “nulladik eleme”. Az aktív zóna geometriailag és magösszetétel szempontjából is igen bonyolult. Magfizikai értelemben igen nagy, hiszen méretei negyságrendilag meghaladják a neutronok – energiafüggő – átlagos szabad úthosszát. A aktív zonában 349 hatszög keresztmetszetű kazetta található, amelyek közül 37 bóracél szabályzórúd, a többi különböző összetételű fűtőelemkazetta. A fűtőelemkazetták 126 fűtőelemet tartalmaznak. A zóna keresztmetszete az I. ábrán látható.



I.ábra

Anyagi minőség szerint is igen összetett a zóna, a tartóelemek cirkónium-nióbium ötvözetből készülnek, a fűtőelem pasztillák az urán-dioxid mellett tartalmazzák a hasadási termékeket is, a vízzel és annak bórsavtartalmával is számolni kell. Inhomogenitások lépnek fel a fentiek miatt a neutron-térben a standard eloszlásokhoz képest.

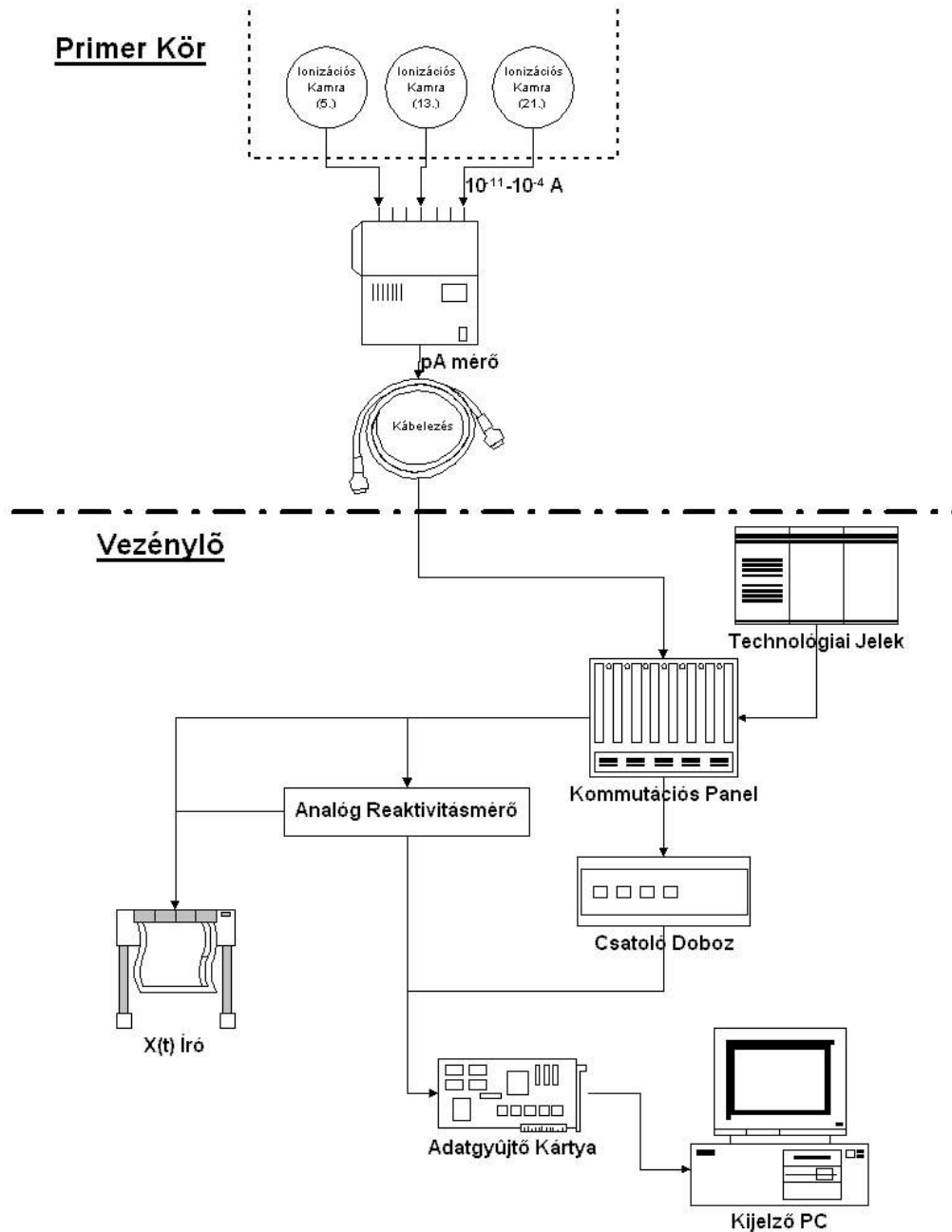
A reaktorfizikai egyenletek statisztikai törvényszerűségeken alapulnak. Az egyenletek által leírt folyamatok valójában sztochasztikus folyamatok, így az egyenletek csak ezek statisztikai átlagát képesek megadni. Általában a reaktorban lejátszódó jelenségek legtöbbször valószínűségi törvényeket követ, a hasadásokban keletkező

neutronok száma, energiája és sebességük iránya, a külső neutronforrás által a reaktorba juttatott neutronok száma, energiája és sebességük iránya, egy adott sebességgel, adott irányban repülő neutron által ütközés nélkül megtett út hossza, egy ütközésben történő magreakció fajtája (szóródás, abszorpció stb.), a szóródott neutron energiája és sebességének iránya mind valószínűségi folyamat. Különösen kis neutronfluxus esetén okoznak ezek lokális fluktuációkat a neutron térben. Az indítási mérések többségét igen kis teljesítményen végzik, többségét a névleges teljesítmény tízezred részén. Az ionizációs kamrák a zónán kívül találhatóak, így oda csak kevesebb neutron jut el. Ezen okok miatt a mérés során a fluktuációk hatása fokozottan jelentkezik, de lassan változó neutronfluxus esetén átlagolásokkal kiküszöbölhetőek.

E folyamatok részletes tárgyalása kívül esik a dolgozatomon, de mérések kiértékelésekor figyelembe kell venni őket. A téma kutatása ma is a reaktorfizika egyik legdinamikusabban fejlődő ágazata.

## A mérési lánc

A jelenlegi mérési lánc blokkvázlata a II. ábrán látható.

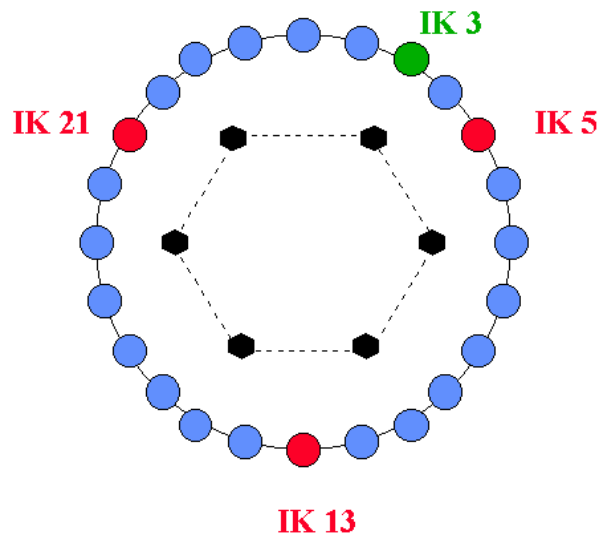


II. ábra

A mérési lánc elején az ionizációs kamrák találhatóak. Ezek differenciális kamrák, azaz kiadott jelük az összes és a gamma-sugárzás különbségével arányosak, ezt tekintjük a neutronfluxussal arányosnak. Egzakt kalibrálásuk jelenleg nem lehetséges,

de a reaktivitás számításához nem is feltétlenül szükséges, hiszen csak a változás alapján számítunk. A kamrák cseréje a nagy költségek és az adott geometriai méretek és helyzet miatt gyakorlatilag nem megoldható, ezért ezek helyettesíthetőségét nem vizsgáltam.

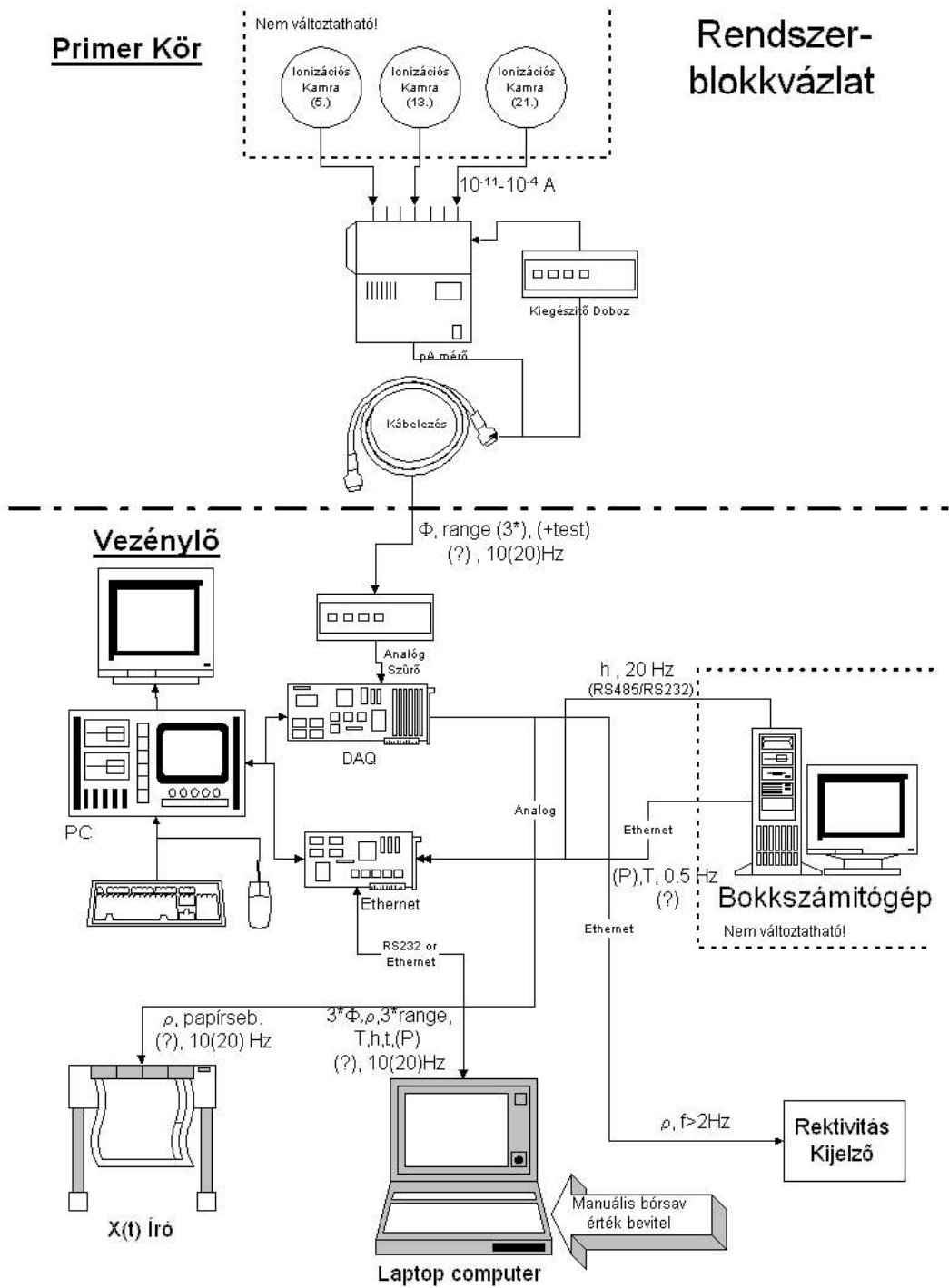
Az ionizációs kamrák elhelyezkedése a III. ábrán látható, a középső hatszög alakú rész jelöli az aktív zóna helyzetét.



III.ábra

A jelenleg a Budapesti Műszaki Egyetemen folyó, monte-carlo módszereken alapuló kutatások alapján a jövőben lehetséges lesz a (17) egyenletben szereplő  $w$  meghatározása, amely egy reaktorfizikai és üzemviteli paraméterektől függő összetett függvény. Ezen eredmények alkalmazhatóak lesznek a fluxusmérés pontosítására is, a kalibráció lehetőségének megteremtése mellett, hiszen egy PC alapú virtuális műszer esetében egy korrekciós függvény segítségével az on-line méréseknél is könnyen figyelembe lehet venni.

A kamrát követő mérőrendszerre a következő, a IV. ábrán látható elrendezést tartom célszerűnek.



IV.ábra



## A pikoamper-mérő műszer

A mérési láncban a kamrákat egy árammérő műszer követi. A kamrák árama  $10^{-11}$  és  $10^{-4}$  A között változik. Az alsó határ csak néhányszor 10 pA, ezért igen érzékeny műszer szükséges. Külön nehezíti a mérést, hogy mivel a műszer a primer körben kap helyet, a hőmérséklet elérheti a 40°C-ot, valamint, hogy a műszer környezetében egyes vezetékeken esetenként igen nagy áramok is folyhatnak.

A mérés lényeges pontosítása nem lehetséges, mert kis áramokat nem tudjuk többszörösen mérni és a nagyobb mérési gyakoriság sem megoldható, mert a pikoamper-mérők integrálási ideje méréshatártól függően 0,1-1 s.

A jelenlegi berendezés az áramnak megfelelően, méréshatáronként 1-10 V nagyságú feszültséggé alakítja a jelet. Ezt nem célszerű megváltoztatni, dokumentációs és mérésellenőrzési okokból.

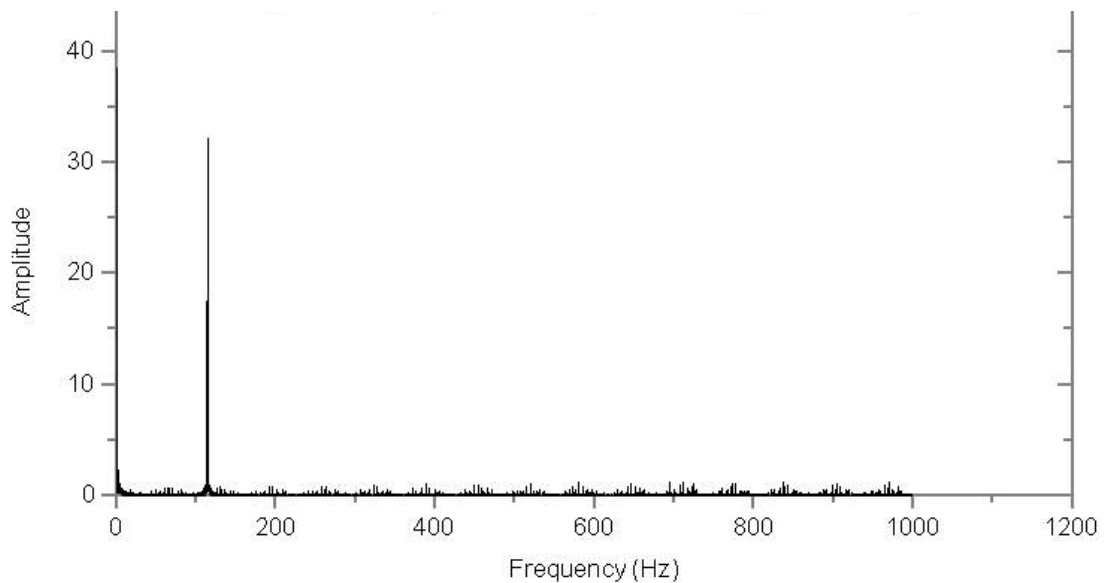
Az árammérés tehát lényegesen nem pontosítható, a IV. ábrán latható „kiegészítő doboz” csupán bizonyos méréshatár feldolgozást végezne a kiértékelések segítésére, valamint technológiai ellenőrzési funkciókat látna el.

Az árammérés hibái valamelyest csökkenthetőek esetlegesen több kamra jelének összeadásával.

## A kábelezés és az analóg szűrés

A pikoamper-mérő jelét a primer körből a vezénylőbe mintegy 100m hosszú kábel továbbítja. Ez az erőművi környezetben számos zajforrással terhelődhet. Cseréje nem megoldható, mert több légmentesen záródó tűz- és sugárgáton halad keresztül.

A zaj az egyéb erőművi berendezések működésétől függ, a különböző reaktorállapotokban sokféle zajt mértem. Az V. ábrán látható zajspektrum igen jellemző, ezen például egyértelműen azonosítható a rúdmozgató motorok 120 Hz-es jele!



V.ábra

Ezen zajokat azonban hagyományos analóg szűréssel nem küszöbölhető ki, annak ellenére, hogy a pikoamper-mérő integrálási ideje alapján tudjuk, hogy minden 10 Hz-nél nagyobb frekvenciájú komponens zaj. Ennek oka a következő. A reaktivitás derivált jellegű mennyiség, amelynek számításakor a késő neutronok figyelembe vételével hosszabb adatsor alapján számolunk, azaz műszaki értelemben a jelalakból számítjuk a reaktivitást. A hagyományos analóg szűrők azonban a megengedettnél jobban eltorzítják a jelalakot a fázistolásuk miatt, vagy nem alkalmasak a kisebb frekvenciájú, azaz a későneutron generációs idők nagyságrendjébe eső zajok szűrésére. Például egy kis fáziseltolású negyedrendű 40 Hz-es aluláteresztő Bessel-szűrő 10 Hz jelen 30°-os fázistolást hajt végre.

A fentiekből következően az analóg szűrésnek a mintavételezési frekvenciánál nagyobb frekvenciájú komponensek szűrésére kell korlátozódnia, azaz a későbbiek alapján egy 1kHz-es analóg szűrő megfelelő választás.

## A mintavételezés

A szűrőből a jel a mérésadatgyűjtő kártyára kerül. A D/A átalakítást célszerű 16 bit pontossággal elvégezni. Ennek oka az, hogy 12 bit pontosság esetén, a méréshatárok alsó határa közelében a kvantálási hibát is figyelembe véve, 0,5 %-os ugrásokat jelentenének, amely szükségtelenül korlátozná a reaktivitásmérés pontosságát, ugyanis a pikoamper-mérő utáni elemek ennél legalább egy nagyságrenddel nagyobb pontosságot képesek biztosítani. Kisebb kvantálási hiba esetén a későbbi digitális szűrések is hatékonyabbak lehetnek.

A mai korszerű mérésadatgyűjtő kártyákkal a programtól függetlenül biztosítható a konzisztens mintavételezés 0,01%-nál kisebb hibával, ami a korábbi programmal megvalósított időzítés 10%-os hibájával szemben nagyban növeli a pontosságot a reaktivitás derivált jellege miatt, valamint lehetővé teszi a sokkal nagyobb mintavételezési frekvenciák alkalmazását, és szükségtelenné teszi a két mintavétel közt eltelt idő mérését és rögzítését.

A számítási eljárás csak 10 Hz-es mintavételezési frekvenciát tesz szükségessé, azonban célszerű ennél sokkal nagyobbat választani. A nagyobb mintavételezési frekvenciát két módon lehet hasznosítani:

- 100 ms gyakorisággal kiválasztunk néhány mért adatot, és ezt a csomagot (burst) tekintjük egy mérési pontnak, majd ebből valamilyen átlagolási eljárással képezzük az értéket.
- A mérési sort 100 ms hosszúságú részekre osztjuk, ezen valamilyen digitális aluláteresztő szűrőt alkalmazunk, a tranzienseket „levágjuk”, ez a maradék adatsorból képezzük egy átlagolási eljárással az értéket.

A fenti eljárásokkal a csökkenthetjük a kvantálási zajt, kiküszöbölhetjük az esetleges hibás A/D konverziók hatását, valamint a második módszerrel a technológiai zajokat is szűrhetjük, de ez sokkal gyorsabb számítógépet igényel.

A 2 kHz mintavételezési frekvencia megfelelő, sokkal nagyobbat nem célszerű választani, mert ez jelentősen megnövelné a számítási igényt, a digitális szűrés hatékonyságát azonban nem növelné jelentősen, kisebb pedig antialiasing zaj fellépéséhez vezethet.

## Az algoritmus alkalmazása

Korábban a számítógépek sebessége nem tette lehetővé a (23) és a (24) egyenletek on-line digitális megoldását, ezért vagy az egyenleteket redukálták két későneuron-csoportra, ami kisebb pontosságot tett lehetővé, mint az off-line hat csoportos megoldás, vagy analóg számító berendezést alkalmaznak, amely az előre számított paraméterek pontos beállítását teszi a gyakorlatban lehetetlenné.

A napjaink számítógépeinek számítási teljesítménye lehetővé teszi a hat csoportos megoldás alkalmazását on-line módon is, akár a digitális szűrések mellett is, így elérhető on-line reaktivitásméréssel is az off-line kiértékelések pontossága.

A számítógép alkalmazása megoldhatóvá teszi a következő problémát is:

A (24) egyenletben szereplő  $C'_{ij}$  kezdőértéke nem adható meg. Ha az inverz kinetika módszerét állandó  $N$  esetén alkalmazzuk, akkor  $C'_{ij}$  értékei a megfelelő értékhez konvergálnak. Mivel a reaktivitásmérések mindig stabil reaktorállapotból indulnak, azért elegendő analóg berendezés esetén is csupán néhány percet várni a  $C'_{ij}$  „beállítására”. Ha azonban mérés közben egy lassú folyamat közben méréshatár-váltás következik be, akkor a mért érték ugrásszerűen egy nagyságrendet változik, és ekkor a  $C'_{ij}$ -k hibás értéket vesznek fel, amely csak ismét néhány perc elteltével korrigálódnak, azaz ez idő alatt a reaktivitás értéke hibás lesz. Virtuális műszer alkalmazásával egyszerűen kiküszöbölhetjük e problémát, oly módon, hogy amikor szükséges, mérünk egy értéket, majd ezzel, mint konstans sorozattal végrehajtjuk az inverz kinetikai módszert a  $C'_{ij}$  értékek stabilizálódásáig. Ezen inicializálás igen rövid idő alatt végrehajtható.

Az újabb kutatások szerint, a késő neutronok hat csoportra bontása helyett pontosabb eredményeket szolgáltatnak a nyolc, vagy még több csoportos eljárások. A fent vázolt virtuális műszer könnyen, költségmentesen módosítható ezek alkalmazására, amennyiben ezek válnak az off-line kiértékelések eszközeivé.

A mérőrendszer további előnye, hogy igény esetén, egyszerűen kibővíthető üzemviteli reaktivitásmérővé, valamint bizonyos ellenőrző funkciókat is elláthat.

## **A fizikai megvalósítás**

A mérőrendszer igen kis méretben megvalósítható.

A rendszer kábelezés feletti részei teljes mértékben redundánsá tehetőek, ami jelentősen növeli a megbízhatóságot. Energetikai reaktoroknál ez igen fontos szempont, mert a meghibásodás miatt bekövetkező késedelmes blokkindításnak jelentős gazdasági vonzatai vannak.

A virtuális műszertechnika révén egyszerűen biztosítható a villamos mérőrendszer teljes tesztelhetősége.

A IV. ábrán látható hordozható számítógép csupán intelligens, grafikus terminálként működik, akár egy más célra éppen nem használt számítógéppel is helyettesíthető. Ennek a megoldásnak az ad létjogosultságot, hogy az indítási mérőrendszer nem üzemviteli berendezés, csak ideiglenesen, a blokkindítások idején használják. Az egyéb részegységei „elrejtethetőek”, ezáltal állandó helyre rögzíthetőek, és csak a terminál igényel ideiglenesen némi helyet az irányítási területen. Ennek számos előnye van, például a könnyebb, gyorsabb szállíthatóság, de elsősorban biztonsági szempontból előnyös, hiszen csak egyetlen kábel csatlakoztatására van szükség, elkerülhető a különféle csatlakozások szerelése, valamint elhelyezése is kötetlenebb, hiszen előírás, hogy semmilyen tárgy sem takarhatja az üzemviteli műszereket.

Az  $x(t)$  író másodlagos, biztonsági adatrögzítésre szolgál. A virtuális műszer esetén ez kibővíthető vagy helyettesíthető egy távoli számítógépre történő folyamatos archiválással, hálózati kapcsolat révén.

## **Összefoglalás:**

Dolgozatomban áttekintettem a pontkinetikai modellt, a reaktivitás mennyiségét, jelentőségét, megvizsgáltam a reaktivitásmérések technológiai hiba és zajforrásait, és felvázoltam egy a mai mérés technikának megfelelő, rugalmas mérőrendszert, amely számos hibaforrást csökkent, vagy kiküszöböl.

Az eddigiekben felvázolt mérőrendszer segítségével pontosíthatóak az on-line reaktivitásmérések, de a neutronfluxus mérések, ezen keresztül a későbbi off-line kiértékelések is nagyobb pontosságúvá válnának. A rendszer segítségével a mérésből származó hibák elhanyagolhatóvá válnak a fizikai zajforrások, valamint a modelltől származó hibák mellett. A mérési pontosság növelése növeli az ellenőrzés hatékonyságát, és jobb alapot biztosít a további kutatásokhoz. A fentiekén túl, további járulékos előnyökkel is szolgál e rendszer. A berendezés méretei lényegesen csökkenthetőek, kisebb teljesítményen kaphatunk értékelhető reaktivitásértékeket, az off-line kiértékeléshez könnyen rögzíthetőek más paraméterek is pontos időmegfeleltetésekkel, valamint a mérési folyamat legtöbb eleme redundánsá tehető. A virtuális műszertechnika révén könnyebben kezelhetővé, jobban ellenőrizhetővé válhat a mérés, és az azonnal szükséges kiértékelések egyes elemei is jobban automatizálhatóak, így gyorsabbá és pontosabbá tehetőek.

A mérőberendezés párhuzamosan működhet a jelenlegi rendszerrel, így a hitelesen megmutatható helyes működése. A párhuzamosan mért adatok alapján a későbbi off-line kiértékelések révén válik összehasonlíthatóvá a mérési pontosság.

Napjainkban különösen előtérbe került a nukleáris reaktorok biztonsága, és rendkívül fontos célkitűzés a biztonság növelése, illetve a biztonságos működés ellenőrizhetőségének biztosítása. Magyarországon ez igen lényeges feladat, hiszen más nagy mennyiségű, olcsó és környezetbarát energiaforrás nem áll rendelkezésre.

## Irodalomjegyzék

- [1] Szatmáry Zoltán: Bevezetés a reaktorfizikába (BME, jegyzet)
- [2] Czibók Tamás – Várhalmi László: A reaktivitás digitális számítása
- [3] Korpás Lajos: Oktatási anyag az üzemviteli személyzet hatósági vizsgájához reaktorfizikából
- [4] Paksi Atomerőmű Rt.: Blokk indítások fizikai mérési programja
- [5] Deme Sándor: Gázionizációs detektorok
- [6] A Paksi Atomerőmű honlapja: <http://www.npp.hu/>
- [7] Cobra Control Kft. Virtuális Méréstechnikai cikkgyűjteménye:  
<http://www.cobra.hu/kerpub.htm>
- [8] Bara Péter: VVER-440 típusú nukleáris reaktor fűtőelemcsere utáni indítási mérései (évfolyamdolgozat)

## Köszönetnyilvánítás:

Itt is szeretnék köszönetet mondani az értékes szakmai segítségükért és türelmükért:

Dr. Korpás Lajos csoportvezető fizikusnak, a témavezetőmnek

(Paksi Atomerőmű Rt, Reaktorfizikai Osztály)

Hamvas István osztályvezetőnek, (Paksi Atomerőmű Rt, Reaktorfizikai Osztály)

Horváth Csaba technikusnak, (Paksi Atomerőmű Rt, Reaktorfizikai Osztály)

Dr. Török Miklós egyetemi docensnek, (SZTE, Kísérleti Fizika Tanszék)

Dr. Gingl Zoltán egyetemi adjunktusnak, (SZTE, Kísérleti Fizika Tanszék)

Dr. Fehér Sándor egyetemi docensnek, (BME, Nukleáris Technika Intézet)

Dr. Porkoláb Sándor főoperátornak, (BME, Nukleáris Technika Intézet)

Lipták Andrásnak, (Cobra Control Kft., National Instruments Képviselő)

és végül, de nem utolsó sorban:

Dr. Szatmáry Zoltán egyetemi tanárnak, a BME Nukleáris Technika Intézetének igazgatójának, aki megismertetett a reaktorfizika világával.



## Tartalomjegyzék:

Bevezetés	2. oldal
A transzport-egyenlet	3. oldal
A pontkinetikai egyenletrendszer	4. oldal
A reaktivitás	5. oldal
A reaktivitás felhasználása	7. oldal
A reaktivitás mérése	9. oldal
A reaktivitásmérések hibaforrásai	11. oldal
Az aktív zóna	12. oldal
A mérési lánc	14. oldal
A pikoamper-mérő műszer	17. oldal
A kábelezés és az analóg szűrés	18. oldal
A mintavételezés	20. oldal
Az algoritmus alkalmazása	21. oldal
A fizikai megvalósítás	22. oldal
Összefoglalás	23. oldal
Irodalomjegyzék	24. oldal
Köszönetnyilvánítás	24. oldal
Tartalomjegyzék	25. oldal