

# Szimbiotikus atomenergia-rendszer vizsgálata

Számítógépes modellezés házi feladat

Perkó Zoltán



Nukleáris Technikai Intézet  
2009

## Tartalomjegyzék

<b>1. Elmélet</b>	<b>3</b>
1.1. Az atomerőmű-rendszer teljesítménye . . . . .	3
1.2. Az atomenergiarendszer modellje és az egyes anyagáramok . . . . .	3
1.3. Tenyészanyag-feleslegű rendszer . . . . .	5
1.4. A határfelfutási exponens . . . . .	8
<b>2. A program által használt algoritmusok</b>	<b>9</b>
<b>3. A program használata</b>	<b>9</b>
<b>4. Validálás</b>	<b>9</b>
<b>5. Konklúzió</b>	<b>11</b>
<b>6. A program forráskódja</b>	<b>12</b>
6.1. AER_P.m . . . . .	12

## Ábrák jegyzéke

1. Az atomenergia-rendszer modellje . . . . .	3
2. 0 külső ciklusidővel rendelkező egyensúlyi rendszer teljesítményének fejlődése . . . . .	10
3. Nem 0 külső ciklusidővel rendelkező egyensúlyi rendszer teljesítményének fejlődése . . . . .	11

## Táblázatok jegyzéke

# 1. Elmélet

## 1.1. Az atomerőmű-rendszer teljesítménye

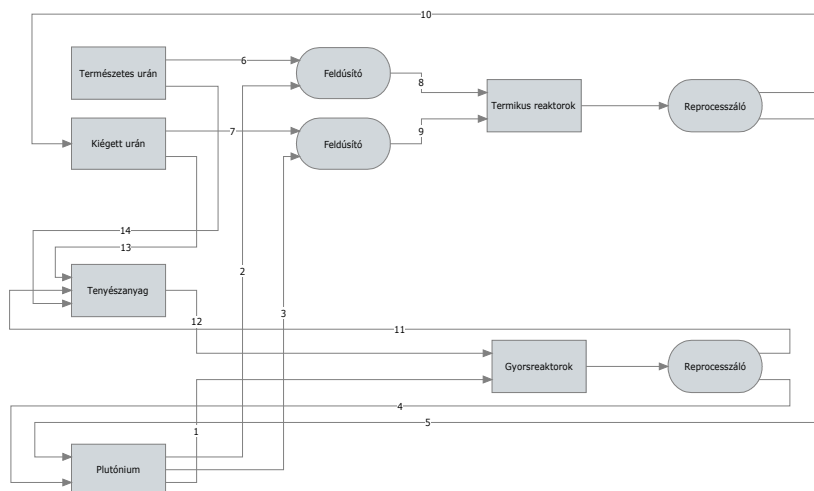
Tegyük fel, hogy atomerőmű-rendszerünk kizárólag kétfajta reaktorból áll, ugyanazon gyors-, illetve termikus reaktorokból. A teljes rendszer teljesítményének változását exponenciális függvénnyel közelítjük:

$$P(t) = P_t(t) + P_f(t) = P_0 \cdot \exp(\omega t), \quad (1)$$

ahol  $P_f(t)$  a gyors-,  $P_t(t)$  pedig a termikus reaktorok által leadott villamos teljesítmény.

## 1.2. Az atomenergia-rendszer modellje és az egyes anyag-áramok

Az atomenergia-rendszer sémáját, illetve az egyes anyagáramok jelölését az 1. ábrán láthatjuk.



1. ábra. Az atomenergia-rendszer modellje

Vezessük be a következő, termikus reaktorokra vonatkozó jelöléseket:

- $e_i$ : új reaktor beindításához szükséges kezdeti üzemanyagdúsítás (m/m%) az aktív zónában
- $e_r$ : reaktor újratöltéséhez szükséges dúsítás (m/m%)
- $e_s$ : reaktorból kikerülő kiegészítő üzemanyag  $^{235}\text{U}$  tartalma (m/m%)
- $m_{ui}$ : új reaktorban tapasztalható kezdeti fajlagos üzemanyag-töltet (kg/MW)
- $m_{ur}$ : egyensúlyi évi üzemanyagszükséglet (kg/MW/év)
- $m_{us}$ : egyensúlyi évi kiegészítő üzemanyag kiürítés (kg/MW/év)

- $m_{pt}$ : egyensúlyi évi hasadóképes plutónium kiürítés (kg/MW/év)
- $\tau_t$ : külső ciklusidő (üzemanyag zónán kívül töltött idejének) azon része, ami az urán rendelkezésre állásától a termikus fűtőelemgyártás kezdetéig eltelik (év)
- $\theta_t$ : külső ciklusidő azon része, ami a termikus fűtőelemgyártás kezdetétől a fűtőelem reaktorba helyezéséig eltelik (év)
- $\Theta_t = \theta_t + \tau_t$

Vezessük be a következő, gyorsreaktorokra vonatkozó jelöléseket:

- $m_{pi}$ : mag kezdeti hasadóképes plutóniumtöltete (kg/MW)
- $m_{pr}$ : egyensúlyi évi hasadóképes plutónium szükséglet (kg/MW/év)
- $m_{pf}$ : egyensúlyi évi hasadóképes plutónium kiürítés (kg/MW/év)
- $m_{di}$ : mag és tenyésztőköpeny kezdeti urántöltete (kg/MW)
- $m_{dr}$ : egyensúlyi évi urán betöltés a magba és a tenyésztőköpenybe (kg/MW/év)
- $m_{dd}$ : egyensúlyi évi urán kiürítés a magból és a tenyésztőköpenyből (kg/MW/év)
- $\tau_f$ : külső ciklusidő azon része, ami az urán rendelkezésre állásától a gyors fűtőelemgyártás kezdetéig eltelik (év)
- $\theta_f$ : külső ciklusidő azon része, ami a gyors fűtőelemgyártás kezdetétől a fűtőelem reaktorba helyezéséig eltelik (év)
- $\Theta_f = \theta_f + \tau_f$

A következő lépés az egyes anyagáramok meghatározása, az itt használt indexek az 1. ábrának felelnek meg. Évente a gyorsreaktorokhoz szükséges plutónium mennyisége:

$$m_1(t) = m_{pr}L_fP_f(t+\theta_f) + m_{pi}\dot{P}_f(t+\theta_f), \quad (2)$$

ahol  $L_f$  a gyorsreaktoros atomerőművek átlagos terhelési tényezője. A gyors- és termikus reaktorok által évente termelt hasadóképes plutónium mennyisége:

$$m_4(t) + m_5(t) = m_{pf}L_fP_f(t-\tau_f) + m_{pt}L_tP_t(t-\tau_t),$$

ahol  $L_t$  a termikus atomerőművek átlagos terhelési tényezője. A gyorsreaktorok igényén felül évenként termelt többlet plutónium mennyisége:

$$m_p^1(t) = m_4(t) + m_5(t) - m_1(t) = m_{pf}L_fP_f(t-\tau_f) + m_{pt}L_tP_t(t-\tau_t) - m_{pr}L_fP_f(t+\theta_f) - m_{pi}\dot{P}_f(t+\theta_f) \quad (3)$$

A gyorsreaktorokból évenként eltávolított szegényített urán tömege:

$$m_{11}(t) = m_{dd}L_fP_f(t-\tau_f) \quad (4)$$

A gyorsreaktorok évenkénti tenyészanyagigénye:

$$m_{12}(t) = m_{dr}L_fP_f(t+\theta_f) + m_{di}\dot{P}_f(t+\theta_f) \quad (5)$$

A termikus reaktorokból évenként eltávolított  $e_s$  koncentrációjú kiegészített urán tömege:

$$m_{10}(t) = m_{us}L_tP_t(t - \tau_t) \quad (6)$$

Mivel egyensúlyi rendszert vizsgálunk, a reaktorokból eltávolított urán  $^{235}\text{U}$  koncentrációja alacsonyabb, mint a természetes uráné, hiszen a termikus reaktorok üzemanyaga is vagy természetes urán, vagy plutóniummal dúsított szegényített urán. Cél, hogy a gyorsreaktorok tenyészanyagigényét a kiegészített uránból fedezzük, ezek alapján két esetet különböztethetünk meg:

- az eltávolított kiegészített urán tömege nagyobb, mint a gyorsreaktorok tenyészanyagigénye, azaz  $m_{10}(t) + m_{11}(t) > m_{12}(t)$ ;
- az eltávolított kiegészített urán tömege kisebb, mint a gyorsreaktorok tenyészanyagigénye, azaz  $m_{10}(t) + m_{11}(t) < m_{12}(t)$ .

A továbbiakban tenyészanyag-feleslegű rendszereket fogunk vizsgálni.

### 1.3. Tenyészanyag-feleslegű rendszer

Mivel a rendszerben tenyészanyag-felesleg van, nem szükséges a természetes urán tenyészanyagként való használata, így

$$m_{14}(t) = 0, \quad (7)$$

továbbá a termikus reaktorokból eltávolított uránnak csak egy részét kell a gyorsreaktorok tenyészanyagaként felhasználni:

$$\begin{aligned} m_{13}(t) &= m_{12}(t) - m_{11}(t) = \\ &= m_{dr}L_fP_f(t + \theta_f) + m_{di}\dot{P}_f(t + \theta_f) - m_{dd}L_fP_f(t - \tau_f) \end{aligned} \quad (8)$$

A termikus reaktorok kiegészített uránjának maradéka a termikus reaktorok el látásához használható:

$$\begin{aligned} m_7(t) &= m_{10}(t) - m_{13}(t) = m_{us}L_tP_t(t - \tau_t) + m_{dd}L_fP_f(t - \tau_f) - \\ &\quad - m_{dr}L_fP_f(t + \theta_f) - m_{di}\dot{P}_f(t + \theta_f) \end{aligned} \quad (9)$$

Ezt a mennyiséget kell feldúsítani  $e_r$  koncentrációra, ehhez évenként  $m_3(t)$  mennyiségű plutónium szükséges:

$$\begin{aligned} m_7(t)e_s + m_3(t) &= m_3(t)e_r + m_7(t)e_r \rightarrow \\ m_3(t) &= (e_r - e_s)/(1 - e_r)m_7(t) = \frac{e_r - e_s}{1 - e_r}. \end{aligned}$$

$$\left( m_{us}L_tP_t(t - \tau_t) + m_{dd}L_fP_f(t - \tau_f) - m_{dr}L_fP_f(t + \theta_f) - m_{di}\dot{P}_f(t + \theta_f) \right) \quad (10)$$

Az így előállított  $e_r$  koncentrációjú üzemanyag tömege:

$$m_9(t) = m_3(t) + m_7(t) = \frac{e_r - e_s + 1 - e_r}{1 - e_r}m_7(t) = \frac{1 - e_s}{1 - e_r}m_7(t) = \frac{1 - e_s}{1 - e_r}.$$

$$\left( m_{us}L_tP_t(t-\tau_t) + m_{dd}L_fP_f(t-\tau_f) - m_{dr}L_fP_f(t+\theta_f) - m_{di}\dot{P}_f(t+\theta_f) \right) \quad (11)$$

A termikus reaktorok évi  $e_r$  hasadóanyagtartalmú üzemanyagigénye

$$m_{tr}(t) = m_{ur}L_tP_t(t+\theta_t),$$

ezért a természetes urán feldúsításával előállított üzemanyagszükséglet az üzemelő reaktorokhoz:

$$m_8^1(t) = m_{tr}(t) - m_9(t) \quad (12)$$

A feldúsításhoz szükséges plutónium mennyisége:

$$m_2^1(t) = \frac{e_r - e_0}{1 - e_0} m_8^1(t) = \frac{e_r - e_0}{1 - e_0} m_{ur}L_tP_t(t+\theta_t) - \frac{e_r - e_0}{1 - e_0} \frac{1 - e_s}{1 - e_r}.$$

$$\left( m_{us}L_tP_t(t-\tau_t) + m_{dd}L_fP_f(t-\tau_f) - m_{dr}L_fP_f(t+\theta_f) - m_{di}\dot{P}_f(t+\theta_f) \right) \quad (13)$$

A feldúsításhoz szükséges természetes urán mennyisége pedig:

$$m_6^1(t) = \frac{1 - e_r}{1 - e_0} m_8^1(t) = \frac{1 - e_r}{1 - e_0} m_{ur}L_tP_t(t+\theta_t) - \frac{1 - e_s}{1 - e_0}.$$

$$\left( m_{us}L_tP_t(t-\tau_t) + m_{dd}L_fP_f(t-\tau_f) - m_{dr}L_fP_f(t+\theta_f) - m_{di}\dot{P}_f(t+\theta_f) \right) \quad (14)$$

Az üzembe lépő termikus reaktorokhoz szükséges  $e_i$  hasadóanyag tartalmú üzemanyag tömege:

$$m_8^2(t) = m_{ui}\dot{P}_t(t+\theta_t) \quad (15)$$

Ennek előállításához szükséges plutónium, illetve természetes urán:

$$m_2^2(t) = \frac{e_i - e_0}{1 - e_0} m_8^2(t) = \frac{e_i - e_0}{1 - e_0} m_{ui}\dot{P}_t(t+\theta_t) \quad (16)$$

$$m_6^2(t) = \frac{1 - e_i}{1 - e_0} m_8^2(t) = \frac{1 - e_i}{1 - e_0} m_{ui}\dot{P}_t(t+\theta_t) \quad (17)$$

Így a termikus reaktorokhoz szükséges természetes urán (ami a teljes rendszer uránszükséglete is egyben, hiszen  $m_{14}(t) = 0$ ):

$$m_6(t) = m_6^1(t) + m_6^2(t) = \frac{1 - e_r}{1 - e_0} m_{ur}L_tP_t(t+\theta_t) - \frac{1 - e_s}{1 - e_0}.$$

$$\left( m_{us}L_tP_t(t-\tau_t) + m_{dd}L_fP_f(t-\tau_f) - m_{dr}L_fP_f(t+\theta_f) - m_{di}\dot{P}_f(t+\theta_f) \right) + \frac{1 - e_i}{1 - e_0} m_{ui}\dot{P}_t(t+\theta_t) \quad (18)$$

A feldúsításhoz szükséges plutónium mennyisége pedig:

$$\begin{aligned}
m_2^p(t) &= m_3(t) + m_2^1(t) + m_2^2(t) = \frac{e_r - e_s}{1 - e_r} \cdot \\
&\left( m_{us} L_t P_t(t - \tau_t) + m_{dd} L_f P_f(t - \tau_f) - m_{dr} L_f P_f(t + \theta_f) - m_{di} \dot{P}_f(t + \theta_f) \right) - \\
&- \left( m_{us} L_t P_t(t - \tau_t) + m_{dd} L_f P_f(t - \tau_f) - m_{dr} L_f P_f(t + \theta_f) - m_{di} \dot{P}_f(t + \theta_f) \right) \cdot \\
&\cdot \frac{e_r - e_0}{1 - e_0} \frac{1 - e_s}{1 - e_r} + \frac{e_r - e_0}{1 - e_0} m_{ur} L_t P_t(t + \theta_t) + \frac{e_i - e_0}{1 - e_0} m_{ui} \dot{P}_t(t + \theta_t) = \\
&= \left( m_{us} L_t P_t(t - \tau_t) + m_{dd} L_f P_f(t - \tau_f) - m_{dr} L_f P_f(t + \theta_f) - m_{di} \dot{P}_f(t + \theta_f) \right) \cdot \\
&\frac{e_0 - e_s}{1 - e_0} + \frac{e_r - e_0}{1 - e_0} m_{ur} L_t P_t(t + \theta_t) + \frac{e_i - e_0}{1 - e_0} m_{ui} \dot{P}_t(t + \theta_t) \quad (19)
\end{aligned}$$

Atomerőmű-rendszerünk akkor egyensúlyi, ha a gyorsreaktorok által termelt többlet plutónium fedezi ezt az igényt, vagyis:

$$m_1^p(t) = m_2^p(t)$$

Az egyensúlyi egyenlet így az alábbi alakot ölti:

$$\begin{aligned}
a_1 P_t(t - \tau_t) + b_1 P_t(t + \theta_t) + c_1 P_f(t - \tau_f) + n_1 P_f(t + \theta_f) + r_1 \dot{P}_t(t + \theta_t) + \\
+ z_1 \dot{P}_f(t + \theta_f) = 0, \quad (20)
\end{aligned}$$

ahol az alábbi jelöléseket használtuk:

$$\begin{aligned}
- a_1 &= L_t(m_{pt} + \epsilon_s m_{us}) \\
- b_1 &= -L_t \epsilon_r m_{ur} \\
- c_1 &= L_f(m_{pf} + \epsilon_s m_{dd}) \\
- n_1 &= -L_f(m_{pr} + \epsilon_s m_{dr}) \\
- r_1 &= -\epsilon_i m_{ui} \\
- z_1 &= -m_{pi} - \epsilon_s m_{di} \\
- \epsilon_s &= \frac{e_s - e_0}{1 - e_0} \\
- \epsilon_r &= \frac{e_r - e_0}{1 - e_0} \\
- \epsilon_i &= \frac{e_i - e_0}{1 - e_0}
\end{aligned}$$

Felhasználva az 1. egyenletet:

$$\begin{aligned}
0 &= a_1 P_t(t - \tau_t) + b_1 P_t(t + \theta_t) + c_1 P_0 \exp(\omega(t - \tau_f)) - c_1 P_t(t - \tau_f) + \\
&+ n_1 P_0 \exp(\omega(t + \theta_f)) - n_1 P_t(t + \theta_f) + r_1 \dot{P}_t(t + \theta_t) + z_1 \omega P_0 \exp(\omega(t + \theta_f)) - z_1 \dot{P}_t(t + \theta_f)
\end{aligned}$$

Hogy az egyensúlyi egyenletet tovább egyszerűsítsük, az alábbi, nem túl nagy megszorítást jelentő feltételezéssel élünk:

$$\theta_t = \theta_f = \theta$$

Bevezetve az alábbi jelöléseket:

- $t' = t + \theta$ ;
- $\lambda_1 = r_1 - z_1$ ;
- $\mu_1 = b_1 - n_1$ ;
- $\nu_1 = z_1\omega + n_1 + c_1 \exp(-\omega\Theta_f)$ ;

egyenletünk így alakul:

$$\lambda_1 \dot{P}_t(t') + \mu_1 P_t(t') + a_1 P_t(t' - \Theta_t) - c_1 P_t(t' - \Theta_f) + \nu_1 P_0 \exp(\omega t')$$

Feltéve tovább, hogy a kiégett üzemanyagok pihentetési és műveleti időszükséglete megegyezik a termikus, illetve a gyorsreaktorokra, vagyis hogy

$$\tau_t = \tau_f = \tau \rightarrow \Theta_t = \Theta_f = \Theta,$$

egyenletünk tovább egyszerűsödik ( $\xi_1 = a_1 - c_1$ ):

$$\lambda_1 \dot{P}_t(t') + \mu_1 P_t(t') + \xi_1 P_t(t' - \Theta) + \nu_1 P_0 \exp(\omega t') = 0 \quad (21)$$

Ezen egyenlet megoldásához szükségünk van a kezdeti függvény ismeretére, azaz  $P_t(t)$ -re  $t < \Theta$  időpontokra.

Diszkrétizáljuk az egyenletet! Ekvidisztans időfelbontással dolgozva:

$$t'_i = h \cdot i$$

$$\lambda_1 \frac{P_t(h \cdot (i+1)) - P_t(h \cdot i)}{h} + \mu_1 P_t(h \cdot i) + \xi_1 P_t(h \cdot i - \Theta) + \nu_1 P_0 \exp(\omega h \cdot i) = 0$$

Bevezetve az  $N = \lceil \frac{\Theta}{h} \rceil$ ,  $l = \Theta - N \cdot h$ , illetve  $P_{t,i} = P_t(h \cdot i)$  jelöléseket:

$$\lambda_1 P_{t,i+1} - \lambda_1 P_{t,i} + h\mu_1 P_{t,i} + h\xi_1 \left( P_{t,i-N-1} \frac{l}{h} + P_{t,i-N} \frac{h-l}{h} \right) + h\nu_1 P_0 e^{\omega h i} = 0$$

Így a termikus reaktorok teljesítményének időbeli alakulását egyensúlyi rendszer esetén az alábbi forma adja meg:

$$P_{t,i+1} = P_{t,i} - \frac{h\mu_1}{\lambda_1} P_{t,i} - \frac{l\xi_1}{\lambda_1} P_{t,i-N-1} - \frac{(h-l)\xi_1}{\lambda_1} P_{t,i-N} - \frac{h\nu_1 P_0}{\lambda_1} e^{\omega h i}$$

#### 1.4. A határfutási exponens

Csak egyfajta gyorsreaktorokat tartalmazó rendszer egyensúlyának feltételét (azt az állapotot, mikor nem szükséges külső plutónium felhasználása és urándúsítás) az alábbi egyenlet adja:

$$L_f m_{pf} \exp(-\omega\Theta_f) - L_f m_{pr} - m_{pi}\omega = 0$$

Ezen egyenlet  $\omega_h$  megoldása adja azt a határfutási exponenst, aminél gyorsabb felfutás esetén semmiképpen sem biztosítható egy vegyes rendszer egyensúlya (hiszen a termikus reaktorokban több hasadóanyag fogy, mint amennyi termelődik). Vagyis az egyensúlyi rendszer keresése során mindig  $\omega < \omega_h$  tartományban kell maradnunk.



## 2. A program által használt algoritmusok

A program egyetlen algoritmussal dolgozik (`AER_P.m`), mely az atomerőmű-rendszer megadott paramétereit, illetve a kezdeti feltételek alapján meghatározza a termikus reaktorok (és így a gyorsreaktorok) teljesítményének további időbeli alakulását. Ehhez természetesen szükség van a kezdeti függvény meghatározására, mely az ismert, a termikus reaktorok teljesítményének időbeli alakulását leíró függvény, és a külső ciklusidők ismeretében történik (hiszen ezek szabják meg, milyen régre kell visszamennünk az időben).

Mindezt megelőzi a főprogramban a határexponens kiszámítása (a Matlab beépített `solve` parancsával), melynél nagyobb felfutási exponens ( $\omega$ ) esetén a program hibaüzenetet ad, hiszen ebben az esetben nem lehetséges egyensúlyi rendszert készíteni.

Az algoritmus természetéből adódóan bizonyos paraméterekre igen érzékeny. Ez amiatt van, hogy egy tenyésztőanyag-feleslegű, kétfajta erőműből álló rendszer egyensúlyához igen sok feltételnek teljesülnie kell (a termikus reaktoroknak biztosítaniuk kell a gyorsreaktorok tenyésztőanyagát, ezek által termelt plutóniumnak pedig a termikus reaktorok hasadóanyagát, méghozzá a megfelelő időpontban). Amennyiben ezek nem teljesülnek, úgy a rendszer nem egyensúlyi, tipikusan plutónium hiányos (jobb esetben plutónium feleslegű), ami abban jelentkezik, hogy a termikus reaktorok teljesítménye 0 alá megy ("negatív plutónium fogyasztással kompenzálva" a plutóniumhiányt). Ezt a program szintén hibaüzenettel jelzi.

## 3. A program használata

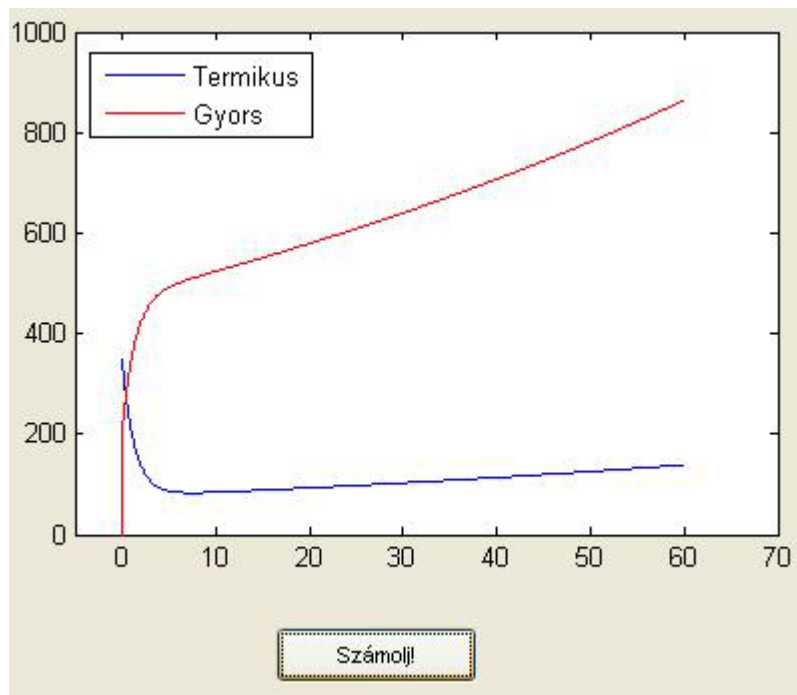
A program használata igen egyszerű: megadva a vegyes atomenergia-rendszer jellemzőit, továbbá az időléptetést ( $h$ ) és a minket érdeklő időtartomány határát (`T_max`), a Számolj! gombra kattintva megjelenik az egyensúlyi rendszerben a termikus- és gyorsreaktorok teljesítményének időbeli változása. Az alapértelmezett paraméterekkel a rendszer egyensúlyi, igen könnyű azonban akár egy paraméter kis változtatásával is nem egyensúlyivá tenni. Érthető okokból akkor kapunk egyensúlyi rendszert, ha nagy kiégésű termikus reaktoraink (kis  $e_s$ ), és jó konverziós tényezőjű gyorsreaktoraink (vagyis a betáplált urán nagy százaléka alakul plutóniummá,  $m_{pf}$  értéke nagy) vannak.

## 4. Validálás

A programot legkönnyebben az elvi határesetnek tekintett 0 külső ciklusidő mellett tudjuk tesztelni. Erre ismert a 21. egyenlet analitikus megoldása:

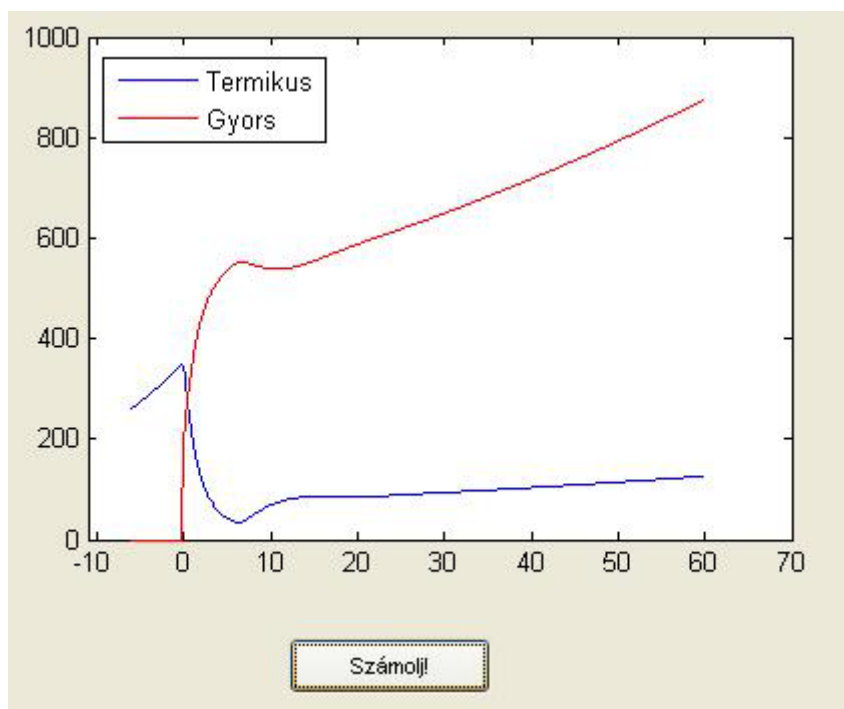
$$P_t(t') = A \cdot \exp(\omega t') + B \cdot \exp\left(-\frac{\mu_1 + \xi_1}{\lambda_1} t'\right)$$

A programmal számolt, a 2. ábrán látható megoldásról könnyen észrevehetjük, hogy két exponenciális összege.



2. ábra. 0 külső ciklusidővel rendelkező egyensúlyi rendszer teljesítményének fejlődése

Nem 0 külső ciklusidő mellett természetesen másfajta görbéket kapunk, az alapértelmezett paramétereket használva (ezek egy mai tipikus LWR-re, és egy igen jó tenyésztési tényezővel rendelkező, elméletben létező reaktorra vonatkoznak) példaként a 3. ábrán látható eredmény adódik. Nem meglepő módon a gyorsreaktorok teljesítménye igen gyorsan emelkedik, a termikusoké pedig csökken, hiszen rögtön a gyorsreaktoroknak kellene előállítaniuk a már meglévő termikus reaktorok következő évi hasadóanyagát. Az sem meglepő, hogy a termikus reaktorok nem tűnnek el, hiszen ezek nélkül nincs elég szegényített urán, amivel táplálni tudnánk a gyorsreaktorokat, éppen ezért hosszú távon ezek teljesítménye is emelkedik.



3. ábra. Nem 0 külső ciklusidővel rendelkező egyensúlyi rendszer teljesítményének fejlődése

## 5. Konklúzió

A programmal lehetséges modellezni egy kétfajta atomerőműből álló rendszer egyensúlyi működését, az azokra jellemző számtalan paraméter mellett. Már önmagában is igen jó eszközt ad annak elemzésére, mennyire alkalmas egy-egy atomerőmű, vagy akár reprocesszási eljárás a zárt üzemanyagciklus megvalósítására. Továbbfejlesztve pedig alkalmas lesz többfajta erőművet tartalmazó egyensúlyi rendszer, az ahhoz elvezető tranziens időszakok (a nem egyensúlyi rendszerről az egyensúlyra való áttérés időszakai), valamint reaktor paraméterek meghatározására.

## 6. A program forráskódja

### 6.1. AER\_P.m

```
function [t,P_t_k]=AER_P(lambda_1,h,mu_1,xi_1,T_max,omega,nu_1,P_0,Theta,KF)

N=floor(Theta/h);
l=Theta-N*h;
t=linspace(-(N+1)*h,0,N+2);
P_t_k=eval(KF);
P_t_k(N+2+floor(T_max/h)+1)=0;

for i=N+3:N+2+floor(T_max/h)+1
    if l>0
P_t_k(i)=(lambda_1-h*mu_1)/lambda_1*P_t_k(i-1)-l*xi_1/lambda_1*P_t_k(i-N-2)-...
(h-l)*xi_1/lambda_1*P_t_k(i-N-1)-h*nu_1*P_0/lambda_1*exp(omega*h*(i-N-2));
    else
P_t_k(i)=(lambda_1-h*mu_1)/lambda_1*P_t_k(i-1)-(h-l)*xi_1/lambda_1*P_t_k(i-N-1)-...
h*nu_1*P_0/lambda_1*exp(omega*h*(i-N-2));
    end
end
```