تخمین غلظت زنون و ساماریوم در یک راکتور هسته ای آب تحت فشار با استفاده از روش لیاپانوف

انصاری فر–غلامرضا* ،زاهدی یگانه – محمد حسین
دانشگاه اصفهان ، دانشکده علوم فناوری‌های نوین ، گروه .مهندسی هسته‌ای

چکیده:
با توجه به اهمیت سموم زنون و ساماریوم در تغییرات قدرت قلب راکتورهای حرارتی و محاسبات دینامیک راکتور و نیز غیر قابل اندازه گیری بودن غلظت این سموم جاذب نوترون، دراین مقاله یک رؤیتگر بر ا ساس مدل سینتیک نقطه‌ای با سه گروه نوترون تأخیری در راکتور و با ا ستفاده از معیار پایداری لیاپانوف بمنظور تخمین غلظت سموم راکتور شامل ساماریوم و زنون طراحی و ارائه میگردد. این رؤیتگر علاوه بر تخمین غلظت سـموم قادر به تخمین غلظت نیا هسـته های نوترونهای تأخیری که اندازه گیری آنها نیز در عمل دشوار است می باشد. نتایج بیانگر تخمین مناسب پارامترهای غیر قابل اندازه گیری و دقت رؤیتگر ارائه شده می باشد.

کلمات کلیدی: نوسانات ساماریوم ،نوسانات زنون، رؤیتگر، معیار لیاپانوف و مدل سینتیک نقطه ای.

مقدمه :

سـموم جاذب نوترون تولیدشـده در راکتورهای هسـته‌ای به علت ایجاد راکتیویته منفی و تأثیر آنها در نوسـانات قدرت راکتورلازم است در طراحی سیگنال کنترلی موردبررسی قرار گیرند. مهم‌ترین سموم در راکتورهای حرارتی شامل زنون و ساماریوم می با شند که رد عمل نمی توان آنها را به طور م ستقیم اندازه گیری نمود؛ لذا لازم ا ست که با طراحی یک رؤیتگر مناسب تخمینی از غلظت این سموم در طی فراینده دینامیکی راکتور برآورد نمود. مسئله پایداری زنون اولین بار تو سط هیفنر[1] [1] مطرح شد که در د سامبر ۱۹۵۵ میلادی، نو سانات توزیع محوری شار تو سط او موردبرر سی قرار گرفت. اولین آنالیز عددی روی نو سانات زنون در سال ۱۹۵۶ تو سط وارد[2] [2]انجام گرفت. سونگ[3] [3]با ا ستفاده از معادلات دینامیکی که از معادله پخش دوگروهی و یک‌بعدی به د ست آمد، نو سانات زنون و توزیع محوری قدرت را با تقریب اولیه سری فوریه، با توجه به قدرت خروجی و شار نوترون و با ا ستفاده از تکنیک‌های ریا ضی کاهش خطا، در یک راکتور غیرهمگن حرارتی، تخمین زد. وو[4] [4]با استفاده از مدل رؤیتگر لیونبرگر[5] روی معادلات خطی‌سازی شده و

---

[1] Heafner
[2] Ward
[3] Song
[4] Woo
[5] luenberger observer

با در نظر گرفتن فیدبک دمای خنک کننده و قدرت خروجی، یک رؤیتگر خطی را برای تخمین نوسانات زنون، طراحی کرد. کارچندانی روی بررسی نوسانات و تخمین غلظت ساماریوم انجام نشده است. البته اخیراً مورینا[6] در مقاله‌ای به بررسی نوسان ساماریوم و راکتیویته حاصل از آن پرداخته است [5] ولی اشاره ای به تخمین غلظت آن نشده است. درتحقیق حاضر یک رؤیتگرمناسب بر اساس مدل سینتیک نقطه‌ای قلب راکتور و با استفاده از معیار پایداری لیاپانوف بمنظور تخمین غلظت سموم راکتور ارائه شده است. که قادر به تخمین غلظت نیا هسته های نوترونهای تأخیری که اندازه گیری آنها نیز در عمل دشوار است می باشد.

روش کار :

قلب راکتوردر قالب مدل سه گروهی سینتیک نقطه‌ای با در نظر گرفتن تمام فیدبک ها به‌صورت زیر مدل‌سازی می گردد.
معادلات نوترونیکی ، سه گروهی نوترون تأخیری سینتیک قلب راکتور:

$$\frac{dn_r}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n_r + \sum_{i=1}^{3} \frac{\beta_i}{l} c_{ri} \qquad \frac{dc_{ri}}{dt} = \lambda_i n_r - \lambda_i c_{ri} \quad i = 1,2,3 \qquad (۱)$$

مدل ترمو هیدرولیکی قلب را به‌صورت زیر در نظر می‌گیریم: [6]

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{(1-f_f)p_0}{\mu_c} n_r + \frac{\Omega}{\mu_c} T_f - \left(\frac{2M+\Omega}{2\mu_c}\right)(2T_c - 290) + \left(\frac{2M-\Omega}{2\mu_c}\right)290 \qquad (۲)$$

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{f_f p_0}{\mu_f} n_r - \frac{\Omega}{\mu_f} T_f + \frac{\Omega}{\mu_f} T_c \qquad Tc = \frac{Ti + Te}{2} \quad Te = 290$$

معادلات تغییر غلظت سموم و هسته‌های مادر سموم را با توجه به ضابطه های تولید و مصرف هرکدام به‌صورت زیر در نظر می‌گیریم.در همین روابط می‌توان تفاوت آهنگ تولید ساماریوم را با زنون مشاهده نمود که همین ، باعث تفاوت نحوه ی نوسان ساماریوم با زنون می‌گردد.درضمن از بهره تولید مستقیم ساماریوم از شکافت صرف نظر شده چراکه بهره ساماریوم۱۴۹(ایزوتوپی که سطح مقطع جذب بالای نوترونی دارد)بسیار بسیار اندک می باشد.حدود 1.7×10^{-12} است.

$$\frac{dx}{dt} = \gamma_x \Sigma_f \phi + \lambda_I I - \sigma_x x \phi - \lambda_x x \qquad \frac{dSm}{dt} = \lambda_{pm} Pm - \sigma_{sm} Sm \phi \qquad (۴)$$

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \Sigma_f \phi - \lambda_I I \qquad \frac{dPm}{dt} = \gamma_{pm} \Sigma_f \phi - \lambda_{pm} Pm$$

راکتیویته ناشی از فیدبک دمای، سموم و میله کنترل به صور زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\rho_t = \alpha_f (tf - tf_0) + \alpha c (tc - tc_0) \qquad \frac{d\rho_r}{dt} = G_r Z_r \qquad \rho_{sm} = -\frac{\sigma_{sm}(Sm - Sm_0)}{\Sigma_f} \qquad (۵)$$

$$\rho_x = -\frac{\sigma_x (x - x_0)}{\Sigma_f} \qquad \rho = \rho_r + \rho_t + \rho_x + \rho_{sm}$$

[6] Moreira

معرفی پارامترها و جدول ضرایب ثابت معادلات:

جدول شماره۱-تعریف علامت گذاری پارامترها و مقادیرآن ها			جدول شماره۲-مقادیر ضرائب ثابت مورد استفاده	
مقدار پارامتر	تعریف پارامتر	پارامتر	مقدار پارامتر	پارامتر
2500MW	حداکثر توان حرارتی راکتور(توان اسمی)	p_0	$(\frac{5}{3}n_{r0} + 4.93333)MW\,\frac{s}{^\circ c}$	Ω
180MeV	انرژی تولیدی به ازای هر شکافت	G	$(n_{r0} - 4.24)\times 10^{-5}\,\frac{\delta k}{k^\circ c}$	α_f
$50.24m^3$	حجم قلب راکتور	V	$(-4n_{r0} - 17.3)\times 10^{-5}\,\frac{\delta k}{k^\circ c}$	α_c
0.3358 cm^{-1}	سطح مقطع ماکروسکپی جذب شکافا	Σ_f	0.92	f_f
$2.1\times10^{-5}\,s^{-1}$	ثابت واپاشی زنون	λ_x	$26.3MW\,\frac{s}{^\circ c}$	μ_f
$2.9e\times10^{-5}\,s^{-1}$	ثابت واپاشی ید	λ_i	$(\frac{160}{9}n_{r0} + 54.022)MW\,\frac{s}{^\circ c}$	μ_c
$3.6\times10^{-6}\,s^{-1}$	ثابت واپاشی پرومتیوم	λ_{pm}	2×10^{-5} s	l
$3.5\times10^{-18}\,cm^{-1}$	سطح مقطع میکروسکپی زنون	σ_x	0.0065	β
$4.01\times10^{-20}\,cm^{-1}$	سطح مقطع میکروسکپی ساماریوم	σ_{sm}	0.00021	β_1
0.003	بهره شکافت زنون	γ_x	0.00225	β_2
0.059	بهره شکافت ید	γ_i	0.00404	β_3
1.08×10^{-2}	بهره شکافت پرومتیوم	γ_{pm}	$0.0124s^{-1}$	λ_1
14.5×10^{-3}	راکتیویته کل میله کنترل	G_r	$0.0369s^{-1}$	λ_2
0.80	چگالی نسبی نوترون ها در زمان شروع شبیه سازی	n_{r0}	$0.632\ s^{-1}$	λ_3

متغیر قابل‌اندازه‌گیری،توان نسبی قلب یعنی n_r می باشد که رابطه آن با توان راکتور به صورت: $p(t) = p_0 n_r(t)$ است.

معادلات زیررا برای تخمین سموم و سه گروه نیا هسته و چگالی نسبی نوترون در نظر می گیریم.

$$\frac{d\hat{n}_r}{dt} = \frac{\hat{\rho} - \beta}{l}\hat{n}_r + \sum_{i=1}^{3}\frac{\beta_i}{l}\hat{c}_{ri} + H_1(n_r - \hat{n}_r) \qquad \frac{d\hat{c}_{ri}}{dt} = \lambda_i\hat{n}_r - \lambda_i\hat{c}_{ri} + H_{1+i}(n_r - \hat{n}_r) \quad i = 1,2,3 \qquad (5)$$

تخمین چگالی نسبی نوترون برای استفاده در جزء اصلاح گر معادلات رؤیتگر می باشد.

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \gamma_x\Sigma_f\phi + \lambda_I\hat{I} - \sigma_x\hat{x}\phi - \lambda_x\hat{x} + H_5(n_r - \hat{n}_r)$$

$$\frac{d\hat{I}}{dt} = \gamma_I\Sigma_f\phi - \lambda_I\hat{I} + H_6(n_r - \hat{n}_r)$$

$$\frac{d\hat{S}m}{dt} = \lambda_{pm}\hat{P}m - \sigma_{sm}\hat{S}m\phi + H_7(n_r - \hat{n}_r) \qquad (۶)$$

$$\frac{d\hat{P}m}{dt} = \gamma_{pm}\Sigma_f\phi - \lambda_{pm}\hat{P}m + H_8(n_r - \hat{n}_r)$$

رابطه شار با چگالی نسبی نوترون به‌صورت $\phi = \frac{p_0}{GV\Sigma_f}n_r$ است.

راکتیویته حاصل از تخمین غلظت سموم به‌صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\rho_{\hat{x}} = -\frac{\sigma_x(\hat{x}-x_0)}{\Sigma_f} \qquad \rho_{s\hat{m}} = -\frac{\sigma_{sm}(\hat{S}m - Sm_0)}{\Sigma_f} \qquad (۷)$$

$$\hat{\rho} = \rho_r + \rho_t + \rho_{\hat{x}} + \rho_{\hat{s}m}$$

طراحی ضرایب رؤیتگر بر اساس روش لیاپانوف: [7]

اگر خطا هارا به‌صورت روبه‌رو تعریف کنیم:

$$e_I = I - \hat{I} \qquad e_n = n_r - \hat{n}_r$$
$$e_{Sm} = Sm - \hat{S}m \qquad e_{c_i} = c_i - \hat{c}_i \Leftarrow i = 1,2,3$$
$$e_{Pm} = Pm - \hat{P}m \qquad e_x = x - \hat{x}$$

تابع لیاپانوف[1] ومشتق زمانی آن را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$\dot{\nu} = \dot{e}_{nr}e_{nr} + \sum\nolimits_1^3 \dot{e}_{Cri}e_{Cri} + \dot{e}_x e_x + \dot{e}_I e_I + \dot{e}_{Sm}e_{Sm} + \dot{e}_{Pm}e_{Pm} \qquad (۹) \qquad \nu = \frac{1}{2}(e_{nr}^2 + \sum\nolimits_1^3 e_{cri}^2 + {e_x}^2 + e_I^2 + {e_{Sm}}^2 + {e_{Pm}}^2) \qquad (۸)$$

مشتقات خطاها را به‌راحتی می‌توان از تفاضل روابط۵و۶ از ۱و۴ به دست آورد.

فقط از ساده‌سازی زیر در نوشتن تفاضل میان راکتیویته ها استفاده می‌کنیم.

$$\rho - \hat{\rho} \longrightarrow = \frac{-\sigma_x e_x - \sigma_{sm}e_{Sm}}{\Sigma_f} \Rightarrow \frac{\rho n_r - \rho\hat{n}_r}{l} = \frac{\hat{\rho} e n_r}{l} - \frac{\sigma_x ex + \sigma_{sm}e_{Sm}}{\Sigma_f}\hat{n}_r$$

مشتق زمانی تابع لیاپانوف برحسب خطاهای تخمین به صورت زیر استخراج می گردد:

برای

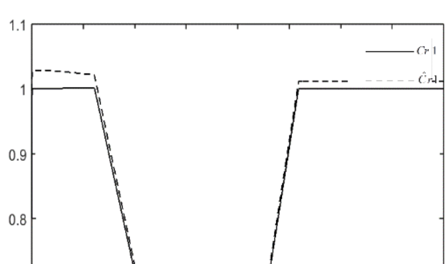
$$\dot{\nu} = (-\frac{\sigma_x \hat{n}_r}{\Sigma_f l} - h_5)e_{nr}e_x + (-\frac{\sigma_{sm}\hat{n}_r}{\Sigma_f l} - h_7)e_{nr}e_{Sm} + \sum_1^3 (\frac{\beta_i}{l} + (\lambda_i - h_{i+1}))e_{nr}e_{cri}$$
$$- \lambda_i e_{cri}^2 + (-\sigma_x\phi - \lambda_x)e_x^2 + \lambda_I e_x e_I - \sigma_{sm}\phi e_{Sm}^2 - h_8 e_{nr}e_{Pm} - \lambda_I e_I^2 + \lambda_{pm}e_{Sm}e_{Pm}$$
$$+ (\frac{\rho_r + \rho_t + \rho_x + \rho_{sm} - \beta}{l} - h_1)e_{nr}^2 - \lambda_{pm}e_{Pm}^2 - h_6 e_{nr}e_I$$

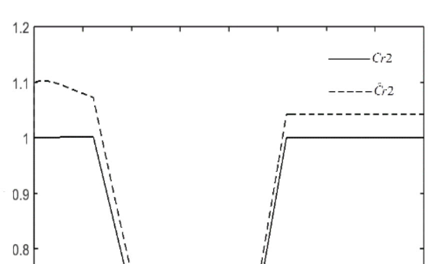
اینکه مشتق زمانی تابع لیا پانوف($\dot{\nu}$) منفی نیمه معین باشد، لازم است شرایط زیر برقرار باشد.

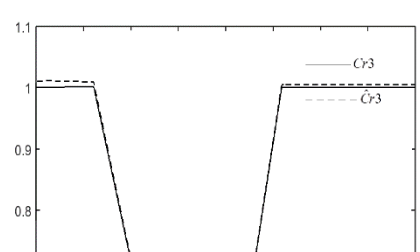
$h_{i+1} = \frac{\beta_i}{l} + \lambda_i$	$h_7 = \frac{\sigma_{sm}\hat{n}_r}{\Sigma_f l}$	$h_5 = \frac{\sigma_x \hat{n}_r}{\Sigma_f l}$	$\frac{\rho_r + \rho_t + \rho_x + \rho_{sm} - \beta}{l} \prec h_1$
$i = 1,2,3$	$0 \prec h_6, h_8 \prec\prec 1$	$-\sigma_x\phi - \lambda_x \prec \frac{\lambda_1}{2}$	$\frac{\lambda_{pm}}{2} \prec \sigma_{sm}\phi$

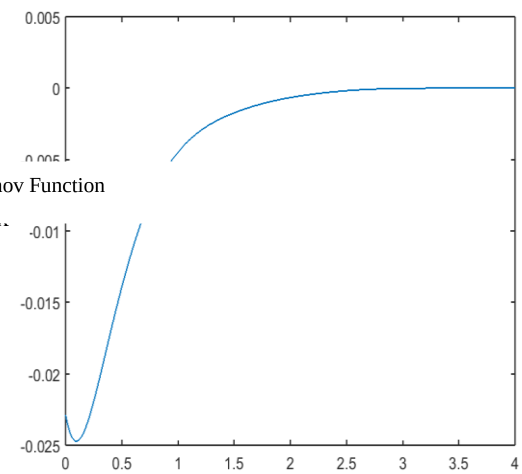
نتایج :

نمودارها برای ۱۰۰ساعت شبیه‌سازی راکتور، بافرض چگالی نسبی اولیه نوترون برابر هشتاد درصد و یک سیگنال کنترلی برای طی کردن روندی کاهشی از صد درصد توان به توان پنجاه درصد و سپس بازگشت به توان صددرصدی روی راکتوراعمال شده است ودر مدل رؤیتگر یک اختلاف اولیه معین از مدل اصلی درنظر گرفته شده است.



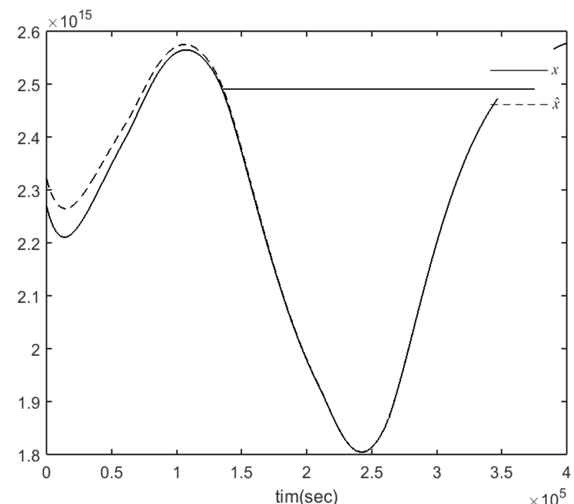




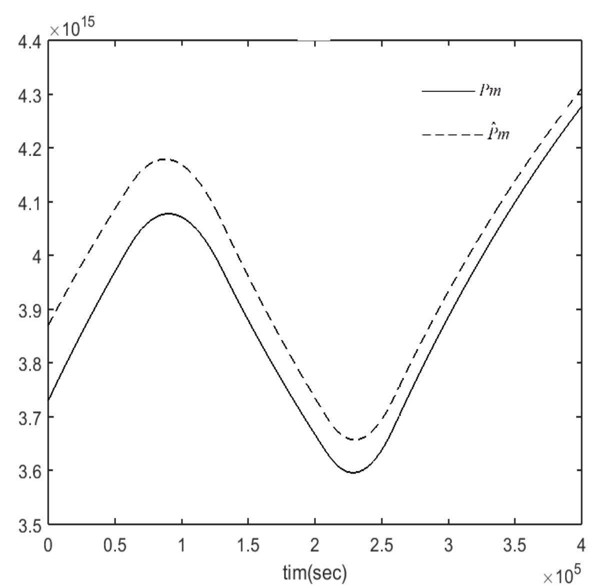


نمودار خطای نسبی تخمین زنون از مقدار واقعی
شکل -۴

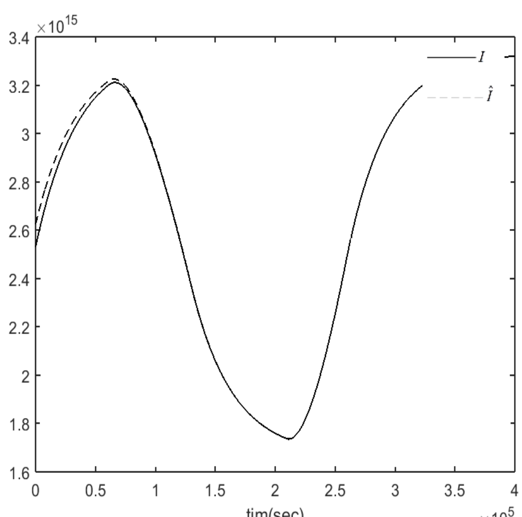
1 Lyapunov Function



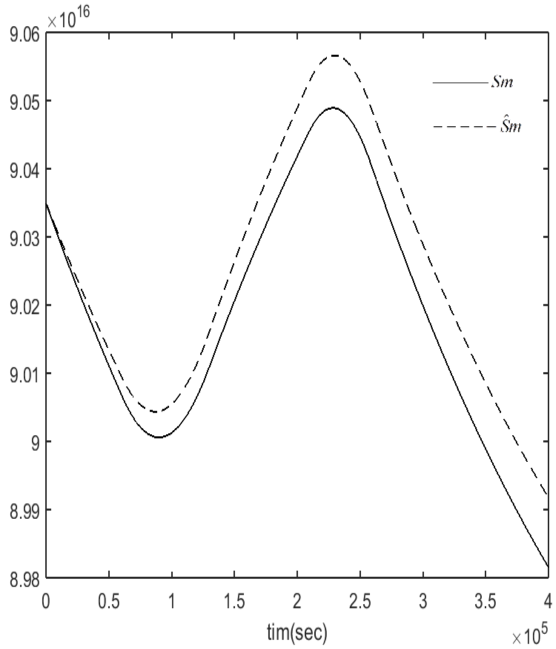
مقایسه مقدار واقعی و تخمین زنون
شکل -۵



مقایسه مقدار واقعی و تخمین پرومتیوم
شکل -۶

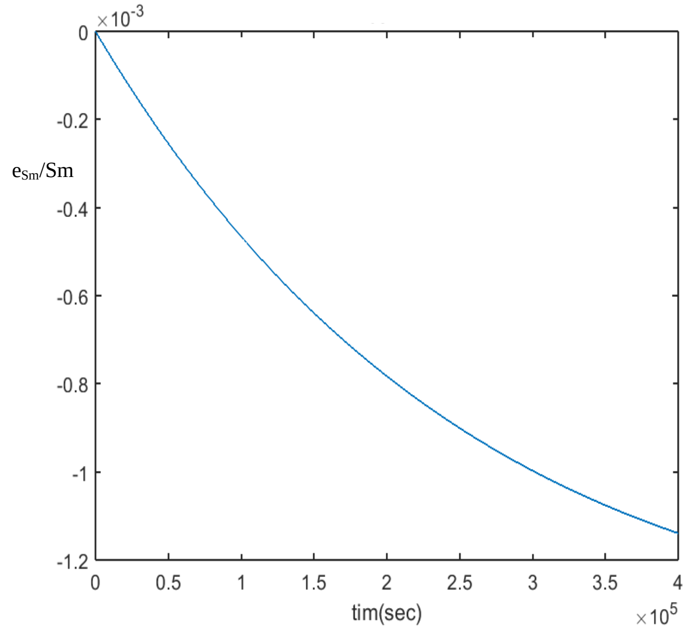


مقایسه مقدار واقعی و تخمینی ید
شکل -۷



مقایسه مقدار واقعی و تخمین ساماریوم

شکل-۸



خطای نسبی تخمین ساماریوم از مقدار واقعی

شکل-۹

در این مقاله، هدف تخمین غلظت پارامترهای غیرقابل اندازه گیری قلب نظیر سموم جاذب نوترون ونیز چگالی نیا هسته های نوترون تأخیری یک رؤیتگر مناسب و پایدار بر اساس روش لیاپانوف طراحی و ارئه گردید که در بررسی و تحلیل فرایند گذار قدرت و طراحی سامانه های کنترلی مناسب قلب راکتور به علت نیاز به اندازه گیری این متغیرهای غیرقابل اندازه گیری حائز اهمیت می باشد. پایداری رؤیتگر طراحی شده توسط معیار لیاپانوف اثبات گردید و نتایج شبیه سازی ها بیان گر پایداری و عملکرد مطلوب تخمینگر

در پیش بینی غلظت سموم جاذب نوترون و نیز چگالی نیا هسته های نوترون تأخیری می باشد.

مراجع :

[1] R.R.Heafner, "Flux oscillation caused by Xenon instability," Nucl.Sci.Technol, p. 201, 1956.

[2] A.G.Ward, "The problem of flux instability in large power reactor," Canadian report CRRP-657, 1956.

[3] N. J.S.Song, "Analytic modeling of the Xenon oscillation due to control rod movement," Journal of the Korea nuclear society, pp. 80-87, 1999.

[4] N. H.S.Woo, " Observer theory applied to the optimal control of Xenon concentration in nuclear reactor," Jornal of the Korea nuclear society, vol. 21(2), pp. , 99-110, 1989.

[5] O. Moreira, "Analysis of 149Sm time evolution and the reactivity contribution," Annals of Nuclear Energy, vol. 83, pp. 87-93, 2015.

[6] D. Hetrick, Dynamic of Nuclear Reactor, The University of Chicago press, 1965.

[7] Slotine, J.J., "Sliding controller design for non-linear systems, " Int. J. Control 40(2),pp 421–434, 1984.