

10. Кинетика на реактор с обратни връзки по реактивност

Действието на ефектите на реактивността върху кинетиката на реактора води до поведение, съществено различно от описаното в раздел 7. При известни (в резултат на неутронно-физични пресмятания и експерименти) коефициенти на реактивността - по температура на топлоносителя, температура на горивото и по мощност; както и при зададен закон на изменение на положението на ОР на СУЗ и на концентрацията на бор, уравненията на кинетиката могат да се модифицират по подходящ начин и да се опише (предвиди) поведението на реактора при преходни процеси.

За анализиране на временния ход на интегралната мощност на реактора и на реактивностния баланс е достатъчно точковото приближение на уравненията на кинетиката при известни (определени чрез неутронно-физични пресмятания) параметри на кинетиката.

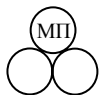
Ако по време на преходния процес се изменя интегралната мощност на реактора при постоянна входна температура на топлоносителя, за отчитане на обратната връзка по реактивност е достатъчно да се знае мощностния коефициент на реактивността $\partial \rho_w / \partial W$, където W е пълната топлинна мощност на реактора.

При известен закон на изменение на реактивността $\rho(t)$ уравненията на кинетиката (7.9) могат да се решат спрямо топлинната мощност $W(t)$, тъй като тя е пропорционална на пълния източник на неутрони в активната зона. От своя страна $\rho(t)$ е функция на $W(t)$:

$$\begin{aligned} \rho(t) &= \rho_{\text{СУЗ}}(t) + (\partial \rho(W) / \partial W) \cdot \Delta W(t) \\ \rho_{\text{СУЗ}}(t) &= (\partial \rho_{\text{ОР}}(H) / \partial H) \cdot \Delta H(t) + (\partial \rho_B(C_B) / \partial C_B) \cdot \Delta C_B(t) \end{aligned} \quad 10.1$$

$\Delta W(t) \equiv W(t) - W_0$ е изменението на мощността спрямо началната стационарна стойност W_0 . $\Delta H(t)$ и $\Delta C_B(t)$ са законите за изменение на височината на ОР на СУЗ и на концентрацията на разтворим бор, а $\partial \rho_{\text{ОР}}(H) / \partial H$ и $\partial \rho_B(C_B) / \partial C_B$ са диференциалните ефективности на съответните ОР на СУЗ и на борното регулиране.

Кинетиката на реактора с обратна връзка по мощност се описва от системата от уравнения (7.9) и (10.1). Решаването на тази система се прави числено, но процедурата е съвсем проста. Резултатът дава възможност да се предвиди мощността $W(t)$ и балансът на реактивността по време на преходния процес.



Ако по време на преходния процес параметрите на активната зона се различават съществено от номиналните, за които е определен мощностния коефициент, отчитането на различните ефекти на реактивността трябва да става поотделно по температура на горивото T_U и температура на топлоносителя T_C . За намирането на тези температури са нужни съответни термохидравлични модели.

Опростен модел на температурната обратна връзка може да се направи, ако за описание на температурното поле в елементарната клетка се използва средната температура на горивото T_U и средната температура на топлоносителя T_C . Уравненията на обратната връзка се съставят по следния начин. Балансът на реактивността е :

$$\begin{aligned}\rho(t) &= \rho_{\text{свз}}(t) + (\partial \rho(T_C) / \partial T_C) \cdot \Delta T_C(t) + (\partial \rho(T_U) / \partial T_U) \cdot \Delta T_U(t) \\ \rho_{\text{свз}}(t) &= (\partial \rho_{OP}(H) / \partial H) \cdot \Delta H(t) + (\partial \rho_B(C_B) / \partial C_B) \cdot \Delta C_B(t)\end{aligned}\quad 10.2$$

$\Delta T_C(t) \equiv T_C(t) - T_{C0}$ и $\Delta T_U(t) \equiv T_U(t) - T_{U0}$ са измененията на средните температури на топлоносителя и на горивото спрямо началните им стационарни стойности T_{C0} и T_{U0} .

Диференциалното уравнение, описващо изменението на T_U , е уравнението на топлинния баланс на горивото:

"скорост на изменение" = "топлинна мощност" - "топлопредаване към топлоносителя на вътрешната енергия на горивото"

$$m_U c_U dT_U / dt = W(t) - k S_U (T_U - T_C)$$

Или:

$$dT_U / dt = W(t) / (m_U c_U) - k S_U (T_U(t) - T_C(t)) / (m_U c_U) \quad 10.3$$

m_U е масата на ядреното гориво, c_U е специфичната му топлемост, k е коефициентът на топлопредаване от горивото към топлоносителя, S_U е площта на топлоотделящите елементи, $W(t)$ е моментната мощност на реактора. Първият член отдясно е скоростта на нагриване на ТОЕ поради отделяната в горивото топлинна мощност. Вторият член отчита охлаждането на ТОЕ чрез топлопредаване към топлоносителя.

Диференциалното уравнение за T_C описва топлинния баланс на топлоносителя. Скоростта на охлаждане на топлоносителя в активната зона е $c_C G \Delta T_C$, където c_C е специфичната топлемост на топлоносителя, G е масовият разход през активната зона, а

ΔT_C е подгряването. Може да се приеме, че $T_C \cong T_{\text{вх.}} + 0.5\Delta T_C$. Тогава топлинният баланс на топлоносителя, изразен чрез средната му температура, е:

$$m_C c_C dT_C / dt = kS_U (T_U - T_C) - 2c_C G (T_C - T_C^{\text{вх.}})$$

m_C е масата на топлоносителя, а $T_{\text{вх.}}$ е входната му температура.

Или:

$$dT_C / dt = kS_U (T_U(t) - T_C(t)) / (m_C c_C) - 2G(t)(T_C(t) - T_C^{\text{вх.}}(t)) / m_C \quad 10.4$$

В стационарен режим и при липса на топлинни загуби температурата на топлоносителя на изхода на активната зона $T_{\text{изх.}} \cong 2T_C - T_{\text{вх.}}$ е равна на температурата на входа на парогенератора T_S . В нестационарен режим това равенство се нарушава поради факта, че за преместване на температурната вълна от реактора до парогенератора е нужно определено време τ , наречено *време на транспортно закъснение*. То е от порядъка на няколко секунди и за ВВЕР-440 и 1000 експериментално определената му стойност е ≈ 5 s. Връзката между $T_{\text{изх.}}$ и T_S е:

$$T_S^{\text{вх.}}(t) = T_C^{\text{изх.}}(t - \tau) \quad 10.5$$

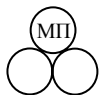
Ако се приеме, че транспортното закъснение в обратната посока - по тракта "парогенератор-реактор" е малко, и се пренебрегне инерционността на топлообмена в парогенератора, системата от уравнения на топлинния баланс може да се затвори с топлинния баланс на парогенератора:

$$T_C^{\text{вх.}} = T_S^{\text{вх.}} - W_S / (c_C G) \quad 10.6$$

W_S е отдаваната в парогенератора мощност.

Системата от уравнения на кинетиката се затваря чрез добавяне към горните уравнения на системата (7.9) от уравнения на кинетиката на "студен" реактор.

Решението на тази система зависи от началните условия: $W(0)$, $T_C(0)$, $T_U(0)$, $T_C^{\text{вх.}}(0)$ и $T_S^{\text{вх.}}(0)$. Решаването ѝ става числено. За тази цел е нужно да се знаят коефициентите в уравнения (10.3)-(10.6) Това са: m_C , c_C , m_U , c_U , k , S_U , τ , G , W_S . Някои от тях, като G и W_S пряко се контролират при работата на реактора и по принцип са известни. Параметрите на топлоносителя m_C и c_C могат да се намерят от конструктивните характеристики на реактора и топлофизичните свойства на водата. Важно е да се помни, че



m_C и c_C зависят от температурата T_C и налягането на топлоносителя в активната зона. Транспортното закъснение τ се пресмята по-трудно, но може да бъде оценено експериментално. Ефектът от τ се проявява само при бързопротичащи преходни процеси. Масата и топлемостта на горивото и конструкционните материали, както и производението kS_U зависят от много фактори и тяхното точно пресмятане е трудно.

Задаването на началните условия и на коефициентите на системата може да се улесни при отчитане на особеностите на работа на реактора в стационарен режим. Ако в момента $t=0$ параметрите на активната зона са постоянни, то:

- разходът G , входната температура $T_C^{bx.}$ и изходната температура $T_C^{изх.}$ на топлоносителя и топлинната мощност W са пряко измерими и известни.

- изходната температура на топлоносителя от активната зона $T_C^{изх.}$ е равна на температурата на входа на парогенератора $T_S^{bx.} : T_C^{изх.}(0) = T_S^{bx.}(0)$

- отвежданата от парогенератора мощност W_S е равна на генерираната в активната зона $W(0)$: $W_S = W(0)$. Разглежданият модел на кинетиката по принцип е полезен само при бързи преходни процеси, когато W_S е практически постоянна величина, така че горното равенство определя един от коефициентите на системата. При бавни преходни процеси, когато $W_S(t) = W(t)$, средната температура на топлоносителя T_C остава практически постоянна и за моделиране на динамиката на реактора е по-уместно да се използва дефинираният при тези условия мощностен коефициент на реактивността, който отчита главно ефекта от температурата на горивото T_U .

Остават неопределени произведенията m_{UCU} и kS_U , както и началната температура на горивото $T_U(0)$. Те могат да бъдат намерени по следния начин.

При описаните условия четирите уравнения (10.3)-(10.6) се свеждат само до две - (10.3) и (10.4) с нулеви леви страни. Така те могат да се разглеждат като алгебрични уравнения за определяне на неизвестните m_{UCU} , kS_U и $T_U(0)$. Тъй като от две уравнения не могат да се определят едновременно и трите неизвестни величини, е нужно да се разгледа още едно допълнително стационарно състояние. Ако (10.3) и (10.4) се приложат за две състояния, характеризирани се с мощности на реактора W_1 и W_2 , и ако W_1 и W_2 , са достатъчно близки, така че m_{UCU} , и kS_U да останат приблизително постоянни, то получената система от 4 уравнения може да се реши за четирите неизвестни m_{UCU} , kS_U , $T_{U1}(0)$ и $T_{U2}(0)$. $T_{U1}(0)$ и $T_{U2}(0)$

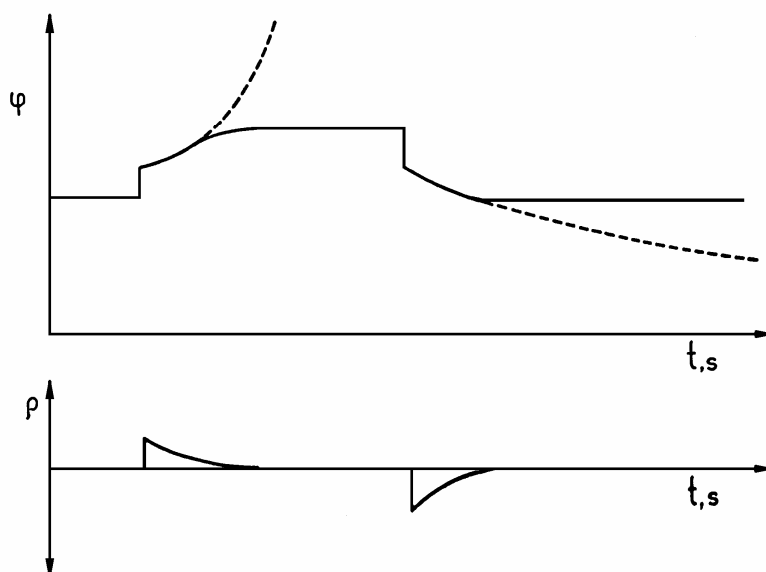
са съответните температури на горивото. Едно от двете състояния се избира да бъде началното. Така началните условия и коефициентите на уравненията на кинетиката на реактора с обратни връзки по температури на горивото и на топлоносителя стават напълно определени.

Този модел на кинетиката може да се използва за анализ на поведението на реактора при бързи преходни процеси и при параметри на активната зона, отличаващи се от стандартните.

С него може да се анализира например така наречената **"повторна критичност"** при охлаждане на активната зона. В края на кампанията, когато концентрацията на бор е минимална или нулева, коефициентът на реактивност по температура на топлоносителя става голям по абсолютна стойност и е отрицателен. При спиране на реактора (освободен мощностен ефект) и разхлаждане на активната зона размножаващите ѝ свойства се подобряват, тъй като липсва или е малък ефектът от повишаване на ядрената концентрация на бор при увеличаване на плътността на топлоносителя. Ако сумарната подкритичност, въведена от спуснатите ОР на СУЗ не е достатъчна за компенсиране на освобождавания температурен ефект, при достигане на определена температура може да настъпи критичност и евентуална надкритичност. Реакторът ще се стабилизира за сметка на доплеровия ефект, но биха настъпили осцилации. Изход от ситуацията е при разхлаждане на активната зона да се поддържа безопасно висока концентрация на бор в топлоносителя.

Пример:

При скокообразна промяна на реактивността на реактор, работещ в стационарен режим (Фиг.10.1), реакторът се стабилизира на по-високо ниво на мощност при положителен скок на реактивността поради отрицателен мощностен коефициент на реактивност - "внесената" положителна реактивност се компенсира от отрицателна реактивност от отрицателния мощностен коефициент на реактивност. При внесена отрицателна реактивност реакторът се стабилизира на по-ниско ниво на мощност поради освободена положителна реактивност от мощностния коефициент на реактивност. При всички реални процеси в обратните връзки има принос и промяната в средната температура на топлоносителя.



Фиг.10.1. Стабилизиране на мощността на реактора при положителен и отрицателен скок на реактивността поради отрицателна обратна връзка (виж раздел 16).

ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ

1) При работа на 50% $N_{\text{ном}}$ и повдигане на ОР със 7.5 cm, реакторът се стабилизира на по-висока мощност. Какво е новото ниво на мощност?

Упътване:

Въведената положителна реактивност от ОР се компенсира от отрицателния мощностен ефект и сумарната реактивност е отново 0:

$$\Delta H \frac{\partial \rho}{\partial H} + \Delta N \frac{\partial \rho}{\partial N} = 0$$

2. При сработване на системата за УРБ при $N_{\text{ном}}=100\%$, група No.1 е въведена в АЗ за време 1.5-4 s. Пресметнете каква реактивност е необходимо да се въведе допълнително от групи 10, 9, 8, ако целта е да се намали мощността до 50% $N_{\text{ном}}$.

Упътване:

$$\rho_1 + \rho_{10,9,8} + \rho_{\text{мощн}}(100\% - 50\%) = 0$$

3. Нека в критичен реактор височината на ОР на СУЗ е H_0 и в момента t_0 тя се изменя с ΔH . Напишете уравненията на кинетиката с обратни връзки по реактивност при

предположение, че входната температура на топлоносителя се поддържа постоянна.

Опишете начин за решаване на тези уравнения.

Упътване:

Зададената реактивност при известна диференциална ефективност на ОР на СУЗ и малко изменение ΔH е:

$$\rho_{\text{СУЗ}} = \frac{\partial \rho}{\partial H}(H_0)\Delta H$$

При постоянна входна температура обратната връзка може да се отчете единствено с мощностния коефициент на реактивността и действителната реактивност е:

$$\rho(t) = \rho_{\text{СУЗ}} + \frac{\partial \rho}{\partial W}(W_0)(W(t) - W_0)$$

$W(t)$ е мощността на реактора по време на преходния процес, а W_0 е началната ѝ стойност. $W(t)$ обаче може да се намери от уравненията на кинетиката само ако е известна действителната реактивност във всеки момент. Следователно горното уравнение може да се използва само в система с уравненията на кинетиката:

$$\rho_{\text{СУЗ}} = \frac{\partial \rho}{\partial H}(H_0)\Delta H$$

$$\rho(t) = \rho_{\text{СУЗ}} + \frac{\partial \rho}{\partial W}(W_0)(W(t) - W_0)$$

$$\frac{dW(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} W(t) + \sum_i \lambda_i C_i$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} W(t) - \lambda_i C_i(t)$$

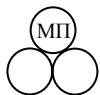
при начални условия:

$$\rho(t_0) = \rho_{\text{СУЗ}}$$

$$W(t_0) = W_0$$

$$C_i(t_0) = \frac{\beta_i}{\Lambda \lambda_i} W_0$$

Подходът за решаване на тази система може да бъде следният:



Ако за много малкия интервал dt се допусне, че реактивността остава практически постоянна и равна на $\rho(t)$, а мощността и концентрациите на ядра-предшественици - постоянни и равни на $W(t)$ и $C_i(t)$, то:

$$dW(t) = W(t+dt) - W(t) = dt \left[\frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} W(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) \right]$$

$$dC_i(t) = C_i(t+dt) - C_i(t) = dt \left[\frac{\beta_i}{\Lambda} W(t) - \lambda_i C_i(t) \right]$$

Така можем да намерим $\rho(t+dt)$, $W(t+dt)$ и $C_i(t+dt)$:

$$W(t+dt) = W(t) + dW(t)$$

$$C_i(t+dt) = C_i(t) + dC_i(t)$$

$$\rho(t+dt) = \rho_{CV3} + \frac{\partial \rho}{\partial W} (W_0) (W(t+dt) - W_0)$$

Започваме процедурата от $t=t_0$ и намираме решението за $t=t_0+dt$, след това я повтаряме и намираме решението за $t=t_0+2dt$, и така нататък.

4) Напишете уравнението за топлинния баланс на горивото и го използвайте, за да получите диференциално уравнение за температурата на горивото.

5) Оценете повишението/понижението на мощността на реактора с обратни връзки по мощност при преместване на регулиращата група с 5 cm, 10 cm нагоре и надолу от положението $K_{eff} = 1$. Приемете диференциална ефективност на ОР $2 \cdot 10^{-3} \text{ \%/cm}$. Използвайте данни за $d\rho/dN$ от таблицата от Приложението на раздел 9.

Упътване:

При въвеждане на положителна/отрицателна реактивност чрез преместване на ОР на СУЗ мощността на реактора ще расте/намалява докато реактивността е различна от нула. Ако обратните връзки не са достатъчни да компенсират тази реактивност, в крайна сметка мощността на реактора ще достигне безкрайност/нула. Ако в някакъв късен момент обратните връзки компенсират реактивността и тя стане нула, реакторът ще се стабилизира при ниво на мощността, което зависи от този момент и от хода на реактивността междувременно. Задачата може да се реши числено по подхода, описан в упътването на задача (1). В специалния случай, когато отрицателната обратна връзка по мощност "мигновено" компенсира въведената реактивност, задачата може да се реши просто в

приближението на "мигновения скок" на уравненията на кинетиката с една група закъсняващи неутрони. Уравненията на кинетиката са:

$$N(t) = N_0 \frac{1}{\beta - \rho} \left\{ \beta \exp\left(\frac{\lambda \rho}{\beta - \rho} t\right) - \rho \exp\left(-\frac{\beta - \rho}{l} t\right) \right\}$$

При преместване на ОР с 5 cm нагоре, въведената реактивност е $10^{-2}\%$.

При $\beta=0.0070$, $l=6 \cdot 10^{-5}$ s и $\lambda=0.08$ s⁻¹,

$$\begin{aligned} W(t) &= \frac{W}{69 \cdot 10^{-4}} \left\{ 70 \cdot 10^{-4} \exp\left(\frac{0.08 \cdot 10^{-4}}{69 \cdot 10^{-4}} t\right) - 10^{-4} \exp\left(-\frac{69 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^{-5}} t\right) \right\} \\ &= W_0 \{1.0145 \exp(0.00159t) - 0.0145 \exp(-115t)\} \end{aligned}$$

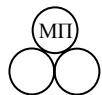
Втората експонента е с нищожна амплитуда и изчезва след 0.04 s, за което време първият член, който нараства с период 629 s изобщо не се променя. Следователно мощността нараства мигновено до $1.0145W_0$, а след това би започнала бавно да се покачва, ако реактивността остане $10^{-2}\%$. При номинална мощност 3000 MW мигновеният скок е 43.5 MW. Мощностният коефициент е $-0.249 \cdot 10^{-3} \%/MW$ и следователно намаляването на реактивността е $43.5 \cdot (-0.249) \cdot 10^{-3} \% = -1.08 \cdot 10^{-2} \%$. Получава се, че действителната реактивност е $(1-1.08) \cdot 10^{-2} \%$, което е практически нула. Резултатът е че след мигновения скок реакторът отново е критичен и запазва достигнатата мощност 3043.5 MW.

При преместване на ОР с 10 cm нагоре всичко е практически същото, освен че мигновеният скок е два пъти по-голям. Въведената реактивност е също два пъти по-голяма, както и мощностния ефект. Реакторът отново се оказва критичен след мигновения скок при мощност 3087 MW.

В общия случай, когато $\rho_0 \ll \beta$, мигновеният скок е $W_0 \frac{\beta}{\beta - \rho_0} \cong W_0 \left(1 + \frac{\rho_0}{\beta}\right)$

Реакторът ще се окаже критичен след мигновения скок, ако

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial W}(W_0) \cdot W_0 \frac{\rho_0}{\beta} &= -\rho_0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial W}(W_0) &= -\frac{\beta}{W_0} \end{aligned}$$



В хода на кампанията мощностният коефициент нараства, вместо да намалява с β , така че след мигновения скок реакторът се оказва подкритичен и ще се стабилизира на по-ниска от оценената, но по-висока от началната мощност. От втората таблица пък се вижда, че при ниска мощност мощностният коефициент не е достатъчно голям и реакторът ще се окаже надкритичен след мигновения скок, поради което ще се стабилизира на по-висока мощност от оценената.