

С348а

П-58

4603/76

Попов А.К. и Рогов А.Д.



Б1-11-10120.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-11-10120

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 76

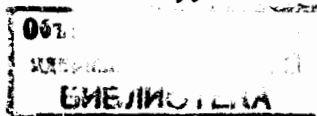
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

А.К. Попов, А.Д. Рогов

Б 1-11-10120

ПРОГРАММА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭВМ
ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА



Дубна, 1976 г.

А н н о т а ц и я

Описана программа для численного исследования динамики импульсного реактора на ЭВМ БЭСМ-6 и СДС-6400. Приводятся математические модели импульсной кинетики реактора, теплообмена в активной зоне и системы автоматического регулирования реактора. Дается пример исследования аварийной ситуации при нарушении кинематической связи ОПО и ДПО. Приводится текст программы на ФОРТРАНЕ.

Введение

Благодаря наличию модуляторов реактивности мощность импульсного реактора носит явно выраженный импульсный характер. Основная доля всей энергии, выделяемой в реакторе, выделяется во время коротких импульсов мощности, длительность которых на несколько порядков меньше длительности периода следования этих импульсов. Величина энергии импульсов (или практически пропорциональная ей амплитуда импульсов мощности) должна или поддерживаться на заданном уровне (режим стабилизации мощности), или изменяться по требуемому закону (например, режим стабилизации заданного периода изменения мощности реактора). Это обеспечивается автоматическим регулятором, осуществляющим целенаправленное изменение реактивности с помощью стержней АР и КС. При этом перемещение стержня АР определяется отклонением регулируемой величины от её заданного значения. Стержень же КС включается в работу лишь при выходе стержня АР за границы установленной средней зоны и своим действием способствует возвращению АР в среднюю зону. Как и для стационарного реактора установившаяся скорость перемещения стержня АР поставлена в пропорциональную зависимость от ошибки регулируемой величины. Для импульсного реактора такой закон перемещения стержня АР является оптимальным в статистическом смысле ^{ж)}, что весьма важно, так как импульсному реактору в силу его конструкции и принципа работы присущи повышенные флуктуации реактивности.

Помимо усреднения ошибки регулирования астатическим АР в программе предусмотрена дополнительная возможность усреднения ошибки.

^{ж)} А.К.Попов. О статистически оптимальном регулировании энергии импульсов быстрого реактора. Атомная энергия, 31, (1971), с.269.

Программа предназначена для моделирования переходных процессов в импульсном реакторе в режиме стабилизации заданного уровня мощности (включая изменение уставки заданного уровня) и в режиме изменения мощности с заданным периодом.

Предусмотрен учёт как типовых регулярных возмущений (по реактивности, входной температуре теплоносителя, расходу теплоносителя), так и случайных возмущений реактивности. Возможно также моделирование аварийных ситуаций, связанных с нарушением кинематической связи модуляторов реактивности.

I. Уравнения кинетики

Исходными уравнениями для описания кинетики импульсного реактора являются известные уравнения:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_{эфф}(1-\beta) - 1}{l} n + \sum_i \lambda_i c_i + s_c \quad (I.1)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{k_{эфф} \beta_i}{l} n - \lambda_i c_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (I.2)$$

где n - плотность нейтронов в реакторе, l - среднее время жизни мгновенных нейтронов, $k_{эфф}$ - эффективный коэффициент размножения нейтронов, $\beta_i, \beta = \sum_i \beta_i$ - соответственно доля запаздывающих нейтронов группы i и суммарная, c_i, λ_i - соответственно концентрация и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i , s_c - внешний источник нейтронов, t - время в сек.

Для удобства от уравнений (I.1) и (I.2) сделан переход к уравнениям в мощностях, выраженных в долях от номинального значения средней мощности реактора:

$$\frac{dP(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_0} [\mathcal{E}(\tau) \cdot P(\tau) + \mathcal{S}(\tau)] \quad (I.3)$$

$$\mathcal{S}(\tau) = \sum_i P_i(\tau) + \mathcal{S}_c \quad (I.4)$$

$$\frac{dP_i(\tau)}{d\tau} = \lambda_i [-P_i(\tau) + \mu_i P(\tau)] \quad (I.5)$$

где $\mathcal{E} = [k_{\text{эфф}}(1-\beta) - 1] / k_{\text{эфф}}\beta$ - реактивность по мгновенным нейтронам, выраженная в долях β ,

$P = n / \bar{n}_n$ - мощность реактора. (Здесь \bar{n}_n - номинальное значение плотности нейтронов, усреднённой по времени),

$P_i = \beta \lambda_i c_i / k_{\text{эфф}}\beta \cdot \bar{n}_n$, $\mathcal{S}_c = \beta \mathcal{S}_c / k_{\text{эфф}}\beta \cdot \bar{n}_n$ соответственно мощность запаздывающих нейтронов группы i и внешнего источника, \mathcal{S} - суммарная мощность источников нейтронов, $\mu_i = \beta_i / \beta$ - относительный выход запаздывающих нейтронов группы i , $T_0 = l / k_{\text{эфф}}\beta$ постоянная времени мгновенных нейтронов в сек.

В импульсных реакторах периодического действия благодаря наличию модуляторов реактивности (например, подвижных отражателей) реактивность, а следовательно, и мощность имеют импульсный характер.

Реактивность реактора можно представить как сумму отрицательной реактивности фона \mathcal{E}_ϕ и накладывающихся на неё периодических импульсов реактивности, обусловленных модуляторами (см. рис.6.I).

Максимальное значение, которое реактивность достигает во время импульса, обозначено через \mathcal{E}_m .

При наличии двух модуляторов (основного и дополнительного) с разной частотой модуляции ξ_m принимает различные значения в различных импульсах. В момент, когда импульсы реактивности формируются одновременно двумя модуляторами, реактор становится надкритическим ($\xi_m > 0$). Генерируемые в результате этого основные импульсы мощности имеют эффективную ширину, лежащую в районе сотни микросекунд, при периоде их следования, составляющем десятки-сотни миллисекунд. Поэтому при моделировании динамики импульсного реактора импульсы мощности можно считать пропорциональными дельта-функциям. В таком же виде представляются и побочные импульсы (сателлиты), генерируемые в моменты времени, когда импульсы реактивности формируются лишь одним основным модулятором реактивности. При этом ($\xi_m < 0$).

Из-за глубокой подкритичности во время между импульсами мощность фона реактора P_ϕ очень мала. Её вклад в величину энергии, выделяемой в реакторе за период следования основных импульсов мощности, составляет несколько процентов.

Учитывая это, уравнения кинетики (I.4) и (I.5) для импульсного реактора сохраняются, а уравнение (I.3) заменяется следующими уравнениями:

$$P(\tau) = P_\phi(\tau) + P_u(\tau) \quad (\text{I.6})$$

$$P_\phi(\tau) = \begin{cases} -\frac{S(\tau)}{\xi_\phi(\tau)} & \text{при } \tau \neq kT \\ 0 & \text{при } \tau = kT \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

$$P_u(\tau) = E_k \cdot \delta(\tau - kT) \quad (\text{I.8})$$

$$E_k = S(\tau = kT - 0) \cdot K_u(\tau = kT) \quad (I.9)$$

$$K_u(\tau = kT) = c \cdot \exp K_L \left[\varepsilon_m(kT), \omega(kT), S(kT-0) \right] \quad I.10$$

Здесь P, P_ϕ, P_u - соответственно ^{суммарная} мощность реактора, мощность фона и импульс^{ная}, в долях от номинального значения средней мощности, $\varepsilon_\phi, \varepsilon_m$ - соответственно реактивность фона и максимальное значение реактивности в импульсе (в долях β), $k = 1, 2, 3, \dots$ - номер импульса реактивности, T - период следования импульсов реактивности в сек, $E_k = E(\tau = kT)$ - энергия k -того импульса мощности в сек, $S(\tau = kT - 0)$ - суммарная мощность источников нейтронов к моменту развития k -того импульса мощности, $K_u, K_L = \ln(K_u/c)$ - соответственно импульсный и логарифмический коэффициенты умножения (K_u - в сек), $c = 1$ сек - коэффициент размерности, ω - скорость вращения основного (более быстрого) модулятора реактивности в $1/\text{сек}$.

При хорошей стабилизации скорости вращения модулятора и умеренных подогревах топлива за время импульса мощности, что характерно для нормальных (не аварийных) режимов, K_u и K_L являются только функциями ε_m и не зависят от ω и S .

Зависимость логарифмического коэффициента умножения K_L от реактивности вводится в программу в виде таблицы через оператор ДАТА. Для определения K_L в промежуточных точках используется стандартная подпрограмма параболической интерполяции.

Таблица значений K_L рассчитывалась с помощью отдельной программы ж) ~~_____~~

2. Реактивность реактора

Реактивность в импульсе \mathcal{E}_m складывается из следующих компонентов (всё в долях β):

$$\mathcal{E}_m(\tau) = \mathcal{E}_\phi(\tau) + \mathcal{E}_{опо}(\tau) + \mathcal{E}_{доп}(\tau) + \mathcal{E}_{сл}(\tau) \quad (2.1)$$

где $\mathcal{E}_\phi(\tau)$ - реактивность фона,

$\mathcal{E}_{опо}(\tau)$ - реактивность основного модулятора реактивности (основного подвижного отражателя),

$\mathcal{E}_{доп}(\tau)$ - реактивность дополнительного модулятора реактивности (дополнительного подвижного отражателя),

$\mathcal{E}_{сл}(\tau)$ - случайная составляющая реактивности (случайная последовательность чисел). Задается только в момент развития импульсов мощности.

Реактивность фона определится как:

$$\mathcal{E}_\phi(\tau) = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_{АР}(\tau) + \mathcal{E}_{КС}(\tau) + \mathcal{E}_\theta(\tau) + \mathcal{E}_t(\tau) + \mathcal{E}_{вк}(\tau) \quad (2.2)$$

где \mathcal{E}_c - постоянная составляющая реактивности (определяется из начальных условий),

$\mathcal{E}_{АР}(\tau)$ - реактивность стержня автоматического регулирования,

ж) А.Д.Рогов. Программа для интегрирования уравнений кинетики ядерного реактора, Дубна (1976).

- $\mathcal{E}_{\kappa c}(\tau)$ - реактивность компенсирующего стержня,
 $\mathcal{E}_{\theta}(\tau)$ - реактивность, обусловленная температурой топлива,
 $\mathcal{E}_T(\tau)$ - реактивность, обусловленная температурой теплоносителя,
 $\mathcal{E}_{\theta \kappa}(\tau)$ - внешние (задаются в начальных данных) возмущения реактивности.

Реактивность основного модулятора реактивности (ОПО) вводится следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{опо}}(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau \neq k \cdot T \\ \mathcal{E}_{\text{опо}} & \text{при } \tau = k T \end{cases} \quad (2.3)$$

$k = 1, 2, 3, \dots, N.$

Реактивность дополнительного модулятора реактивности ████████ вводить или аналогично основному модулятору:

$$\mathcal{E}_{\text{доп}}(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau \neq k \cdot \bar{m} \cdot T \\ \mathcal{E}_{\text{доп}} & \text{при } \tau = k \cdot \bar{m} \cdot T \end{cases} \quad (2.4)$$

или задавать в виде непрерывной функции времени (например, при моделировании рассинхронизации и торможении ДПО). Здесь $\tau = k T$ - момент появления импульса-спутника; $\tau = k \bar{m} T$ - момент появления основного импульса мощности; \bar{m} - отношение частоты модуляции реактивности основным модулятором к частоте основных импульсов мощности; N - число рассчитываемых импульсов.

Изменение реактивности за счет теплового расширения топлива и эффекта Доплера в нём и за счет расширения теплоносителя соответственно запишется следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\theta}(\tau) = \gamma_{\theta} \cdot [\theta_{\tau}(\tau) - t_{10}] \quad (2.5)$$

$$\epsilon_T(\tau) = \gamma_T \cdot [t_{cp}(\tau) - t_{10}] \quad (2.6)$$

где γ_0 - температурный коэффициент реактивности топлива (доли $\beta/^\circ\text{C}$), γ_t - температурный коэффициент реактивности теплоносителя (доли $\beta/^\circ\text{C}$), $t_{cp}(\tau)$ - температура топлива, усредненная по высоте и по радиусу ТВЭла ($^\circ\text{C}$), $t_{cp}(\tau)$ - температура теплоносителя, усредненная по высоте канала в активной зоне (по высоте ТВЭла) ($^\circ\text{C}$), t_{10} - начальное значение температуры теплоносителя на входе в активную зону ($^\circ\text{C}$).

Реактивность автоматического регулятора представлена в виде:

$$\epsilon_{AP}(\tau) = 0,5 \cdot \epsilon_{Am} \cdot \sin(\omega \cdot l_{AP}) \quad (2.7)$$

где l_{AP} - перемещение стержня AP в относительных единицах ($-0,5 \leq l_{AP} \leq 0,5$), ϵ_{Am} - максимальная эффективность AP в долях β .

Реактивность компенсирующего стержня выражается аналогично:

$$\epsilon_{Kc}(\tau) = 0,5 \cdot \epsilon_{Kc} \cdot \sin(\omega \cdot l_{Kc}) \quad (2.8)$$

где l_{Kc} - перемещение стержня КС (в относительных единицах), ($-0,5 \leq l_{Kc} \leq 0,5$), ϵ_{Kc} - максимальная эффективность в долях β .

3. Уравнения теплообмена в активной зоне в средних температурах

Для упрощения рассмотрения задачи принят ряд допущений:

- а) активная зона реактора состоит из идентичных тепловыделяющих элементов (ТВЭ) с одинаковым тепловыделением,
- б) ~~.....~~
- в) переток тепла в осевом направлении отсутствует,
- г) поток теплоносителя равномерно распределён по технологическим каналам активной зоны, которые также считаются идентичными.

Все эти предположения дают возможность рассматривать тепловые процессы только в одном эквивалентном канале активной зоны, схема которого приведена на рис. 3.1.

Уравнения передачи тепла в активной зоне реактора находятся из условий теплового баланса. Для перехода от уравнений в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям зависимость температуры теплоносителя от высоты активной зоны аппроксимировалась многочленом Эрмита третьей степени ^{ж)}. В результате получена следующая система дифференциальных уравнений, описывающая переходные тепловые процессы в активной зоне реактора.

$$\frac{d\theta_1(\tau)}{d\tau} = a_1 P(\tau) - a_2 [\theta_1(\tau) - t_{cp}(\tau)] \quad (3.1)$$

$$\frac{d\theta_2(\tau)}{d\tau} = a_1 P(\tau) - a_2 [\theta_2(\tau) - t_1(\tau)] \quad (3.2)$$

$$\frac{d\theta_3(\tau)}{d\tau} = a_1 P(\tau) - a_2 [\theta_3(\tau) - t_2(\tau)] \quad (3.3)$$

ж) М.Х.Дорри, Приближенные решения некоторых уравнений теплообмена в частных производных на аналоговой вычислительной машине. Автоматика и Телемеханика, № 8 (1966), с. 124-130.

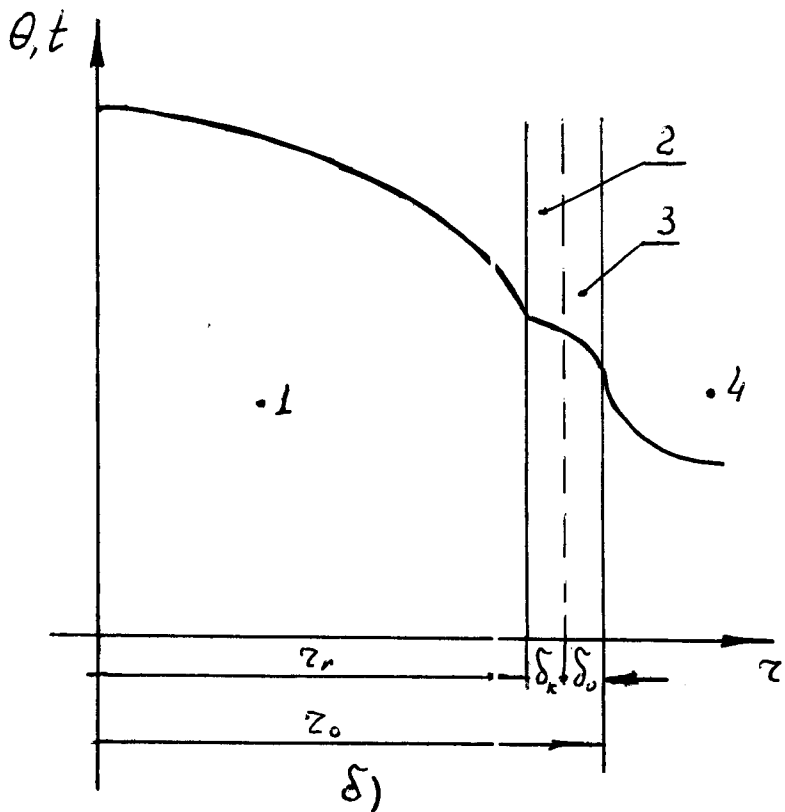
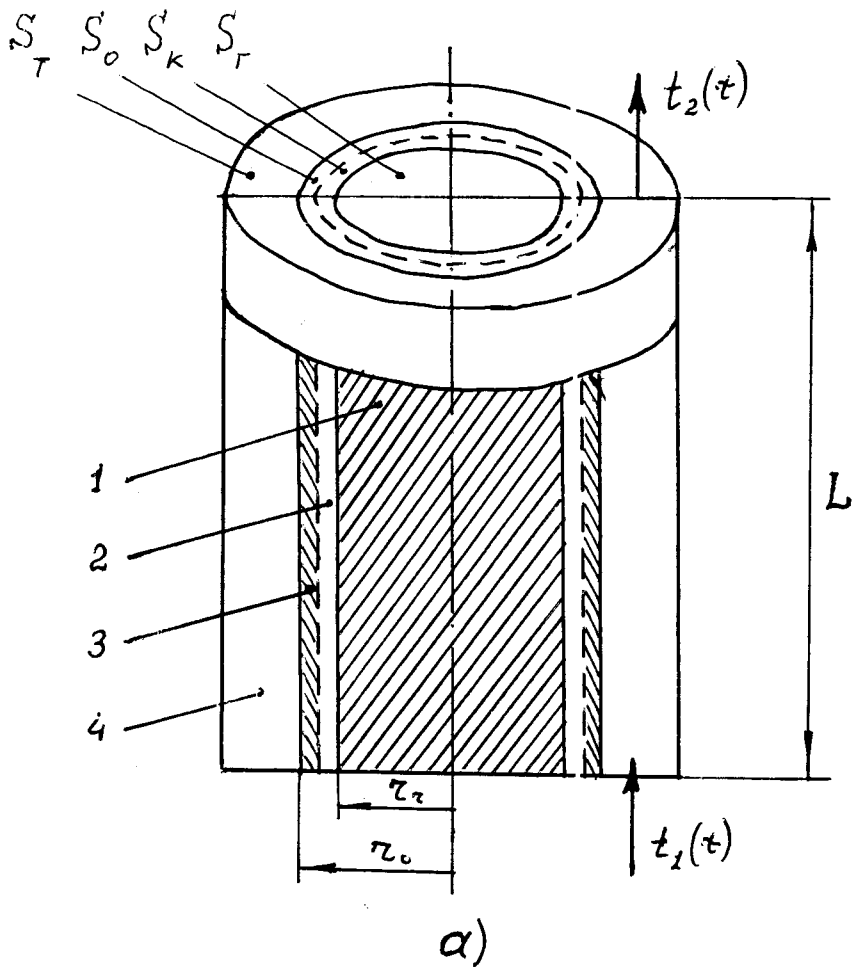


Рис. 3.1. а - схема эквивалентных ТВЭла и канала теплоносителя, б - распределение температур. 1 - топливо, 2 - контактный слой, 3 - оболочка, 4 - теплоноситель.

$$\frac{dt_{cp}(\tau)}{d\tau} = a_3 [\theta_{cp}(\tau) - t_{cp}(\tau)] + a_4 [t_1(\tau) - t_2(\tau)] \quad (3.4)$$

$$\frac{dt_2(\tau)}{d\tau} = 12 \cdot a_4 \cdot t_{cp}(\tau) - 6 \cdot a_4 [t_1(\tau) + t_2(\tau)] + \frac{dt_2(\tau)}{d\tau} - a_3 [\theta_1(\tau) - t_1(\tau) - \theta_2(\tau) + t_2(\tau)] \quad (3.5)$$

где $\theta_1(\tau)$ - температура топлива на нижнем конце эквивалентного ТВЭла ($^{\circ}\text{C}$),

$\theta_2(\tau)$ - температура топлива на верхнем конце эквивалентного ТВЭла ($^{\circ}\text{C}$),

$\theta_{cp}(\tau)$ - температура топлива, усреднённая по высоте ТВЭла ($^{\circ}\text{C}$),

$t_1(\tau)$ - температура теплоносителя на входе в активную зону ($^{\circ}\text{C}$),

$t_2(\tau)$ - температура теплоносителя на выходе из активной зоны ($^{\circ}\text{C}$),

$t_{cp}(\tau)$ - температура теплоносителя, усреднённая по высоте ТВЭла ($^{\circ}\text{C}$),

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ - константы, где: $1/\alpha_2$ - постоянная времени звена, за входную величину которого принята средняя мощность, а за входную - температура топлива,

α_1/α_2 - коэффициент передачи этого звена,

$1/\alpha_4$ - постоянная времени звена, за входную величину которого принята средняя температура теплоносителя, а за входную - температура топлива,

$$\alpha_1 - (0\text{C}/\text{c}), \quad \alpha_2 - (1/\text{c}), \quad \alpha_3 - (1/\text{c}), \quad \alpha_4 - (1/\text{c})$$

Причем

$$\alpha_1 = P_{vH} \frac{S_r}{C_r \cdot \gamma_r \cdot S_r + C_k \cdot \gamma_k \cdot S_k + C_o \cdot \gamma_o \cdot S_o} \quad (3.6)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\pi \cdot z_0 \cdot k}{c_r \cdot \gamma_r \cdot S_r + c_k \cdot \gamma_k \cdot S_k + c_o \cdot \gamma_o \cdot S_o} \quad (3.7)$$

$$\alpha_3 = \frac{2\pi \cdot z_0 \cdot k}{c_T \cdot \gamma_T \cdot S_T} \quad (3.8)$$

$$\alpha_4 = \frac{w}{L} \quad (3.9)$$

$$k = \frac{1}{\frac{z_o}{4\lambda_p} + \frac{z_o}{z_r} \left(\frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{\delta_o}{\lambda_o} \right) + \frac{1}{\mathcal{L}}} \quad (3.10)$$

Здесь P_{vH} - номинальное значение удельной мощности, выделяемой в единице объема топлива в процессе деления (Вт/см^3), S_r, S_k, S_o, S_T - соответственно сечение топлива (горючего), контактного слоя, оболочки и эквивалентного канала теплоносителя (см^2), c_r, c_k, c_o, c_T - соответственно теплоёмкость топлива, контактного слоя, оболочки и теплоносителя ($\text{Вт} \cdot \text{с} / \text{г} \cdot \text{°C}$), $\gamma_r, \gamma_k, \gamma_o, \gamma_T$ - соответственно плотность топлива, контактного слоя, оболочки и теплоносителя (г/см^3),

z_r, z_o - соответственно радиус топлива и наружный радиус оболочки (см),

δ_k, δ_o - соответственно толщина контактного слоя и оболочки (см),

$\lambda_r, \lambda_k, \lambda_o$ - соответственно коэффициент теплопроводности топлива, контактного слоя и оболочки ($\text{Вт/см} \cdot \text{°C}$),

\mathcal{L} - коэффициент теплоотдачи от оболочки к теплоносителю ($\text{Вт} \cdot \text{м} / \text{см}^2 \cdot \text{°C}$),

w - скорость теплоносителя (см/с),

L - высота активной зоны (см),

k - коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю ($\text{Вт} \cdot \text{м} / \text{см}^2 \cdot \text{°C}$)

Коэффициент теплопередачи получен для средних по радиусу температур топлива и теплоносителя, исходя из уравнений теплопроводности для стационарного состояния. В программе предусмотрена возможность для моделирования изменения температуры теплоносителя на входе в активную зону, которая задаётся в следующем виде:

$$t_2(\tau) = \begin{cases} t_{20} \\ t_{20} + \Delta t_2 \cdot (1 - e^{-\tau/T_{11}}) \end{cases}$$

где t_{20} , Δt_2 , T_{11} - задаваемые константы.

4. Моделирование системы регулирования

Дифференциальные уравнения, описывающие перемещение автоматического регулятора с учетом его инерционности имеют следующий вид:

$$\frac{d\Delta_A(\tau)}{d\tau} = v_A^*(\tau) \quad (4.1)$$

Предусмотрены две возможности учета запаздываний перемещения АР относительно сигнала управления.

а) в канал АР вводятся два инерционных звена с постоянными времени T_{A1} и T_{A2} :

$$\frac{d v_A^*(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_{A2}} \cdot (-v_A^*(\tau) + w_A^*(\tau)) \quad (4.2)$$

$$\frac{d w_A^*(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_{A1}} \cdot (-w_A^*(\tau) + \Delta_A(\tau)) \quad (4.3)$$

б) в канал АР вводится одно инерционное звено с постоянной времени T_{A1} :

$$v_A^*(\tau) = w_A^*(\tau) \quad (4.4)$$

$$\frac{d w_A^*(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_{A1}} \cdot (-w_A^*(\tau) + \Delta_A(\tau)) \quad (4.5)$$

где $L_A(t)$ - перемещение стержня AP (в относительных единицах),
 $v_A(t)$ - скорость стержня AP (отн.ед/с),
 T_{A1}, T_{A2} - постоянные времени AP (с),
 $\Delta_A(t)$ - сигнал управления стержнем AP с учетом зоны нечувствительности и ограничением уровня (насыщение). График сигнала управления приведён на рис. 4.1.

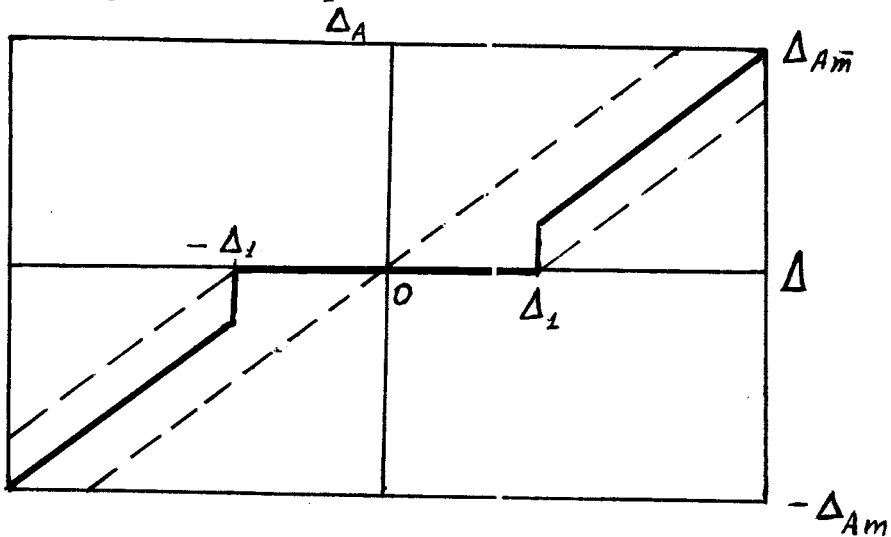


Рис. 4.1. Управляющий сигнал AP с учетом зоны нечувствительности Δ_A ; Δ - ошибка регулирования.

Управляющий сигнал с зоной нечувствительности формируется по следующему закону:

$$\Delta_A = \begin{cases} 0 & \text{при } |\Delta| \leq \Delta_1, \\ \Delta - C_A \Delta_1 & \text{при } \begin{cases} |\Delta| > \Delta_1 \\ |\Delta - C_A \Delta_1| < \Delta_{Aм} \end{cases}, \\ \Delta_{Aм} & \text{при } \Delta - C_A \Delta_1 \geq \Delta_{Aм}, \\ -\Delta_{Aм} & \text{при } \Delta - C_A \Delta_1 \leq -\Delta_{Aм}. \end{cases} \quad (4.6)$$

где: $0 \leq C_A \leq 1$, Δ_{Am} , $0 \leq \Delta_1 \leq \Delta_{Am}$ - константы.

Δ - ошибка регулирования, которая формируется по одному из трех законов, объяснение которых будет дано ниже;

Δ_{Am} - определяется исходя из предельно допустимого значения скорости изменения реактивности $\Delta\rho - (d\epsilon_A/d\tau)$ по формуле:

$$\Delta_{Am} = \frac{(d\epsilon_A/d\tau)_{\max}}{0,5 \cdot \beta \cdot \epsilon_{A\max}}$$

Система уравнений для компенсирующего стержня имеет похожий вид. Скорость КС:

$$\frac{dv_{kc}(\tau)}{d\tau} = v_{k_2}(\tau) \quad (4.7)$$

Предусмотрены две возможности учета запаздывания:

а) Сигнал управления КС проходит через два инерционных звена с постоянными времени T_{kc1} и T_{kc2} :

$$\frac{dv_{kc}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_{kc2}} \cdot (-v_{kc}(\tau) + w_{kc}(\tau)) \quad (4.8)$$

$$\frac{dw_{kc}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_{kc1}} \cdot (-w_{kc}(\tau) + v_{kc}(\tau)) \quad (4.9)$$

б) Сигнал управления КС проходит через одно инерционное звено с постоянной времени T_{kc1} :

$$v_{kc}(\tau) = w_{kc}(\tau) \quad (4.10)$$

$$\frac{dw_{kc}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_{kc1}} \cdot (-w_{kc}(\tau) + v_{kc}(\tau)) \quad (4.11)$$

где : $l_{кc}(t)$ - перемещение стержня КС (отн. единицы),
 $v_{кc}(t)$ - скорость КС (отн. ед./с),
 $T_{1кc}, T_{2кc}$ - постоянные времени КС (с),
 $U_{кc}(t)$ - релейный сигнал управления КС,

При моделировании нелинейная зависимость релейного сигнала управления КС задается следующим образом (см. рис. 4.2) в зависимости от скорости и перемещения стержня АР:

$$U_{кc}(t) = \begin{cases} U_{кcm} & \text{при } \begin{cases} l_A \geq l_{A2} \text{ и } v_A > 0 \\ l_A \geq l_{A1} \text{ и } v_A \leq 0 \text{ и } U_{кc}(t-0) \neq 0 \end{cases} \\ 0 & \text{при } \begin{cases} -l_{A1} < l_A < l_{A2} \text{ и } v_A > 0 \\ -l_{A2} < l_A < l_{A1} \text{ и } v_A < 0 \end{cases} \\ -U_{кcm} & \text{при } \begin{cases} l_A \leq -l_{A1} \text{ и } v_A > 0 \text{ и } U_{кc}(t-0) \neq 0 \\ l_A \leq -l_{A2} \text{ и } v_A < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (4.12)$$

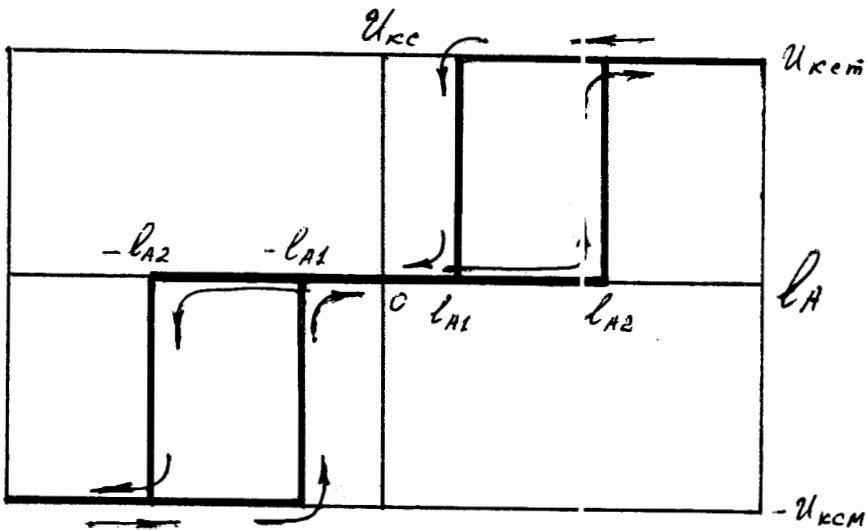


Рис. 4.2. Релейный сигнал управления КС.

где : $l_{кc}(t)$ - перемещение стержня КС (отн. единицы),
 $\dot{l}_{кc}(t)$ - скорость КС (отн. ед./с),
 $T_{1кc}, T_{2кc}$ - постоянные времени КС (с),
 $U_{кc}(t)$ - релейный сигнал управления КС,

При моделировании нелинейная зависимость релейного сигнала управления КС задается следующим образом (см. рис. 4.2) в зависимости от скорости и перемещения стержня АР:

$$U_{кc}(t) = \begin{cases} U_{кcm} & \text{при } \begin{cases} l_A \geq l_{A2} \text{ и } \dot{v}_A > 0 \\ l_A \geq l_{A1} \text{ и } \dot{v}_A \leq 0 \text{ и } U_{кc}(t-0) \neq 0 \end{cases} \\ 0 & \text{при } \begin{cases} -l_{A1} < l_A < l_{A2} \text{ и } \dot{v}_A > 0 \\ -l_{A2} < l_A < l_{A1} \text{ и } \dot{v}_A < 0 \end{cases} \\ -U_{кcm} & \text{при } \begin{cases} l_A \leq -l_{A1} \text{ и } \dot{v}_A > 0 \text{ и } U_{кc}(t-0) \neq 0 \\ l_A \leq -l_{A2} \text{ и } \dot{v}_A < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (4.12)$$

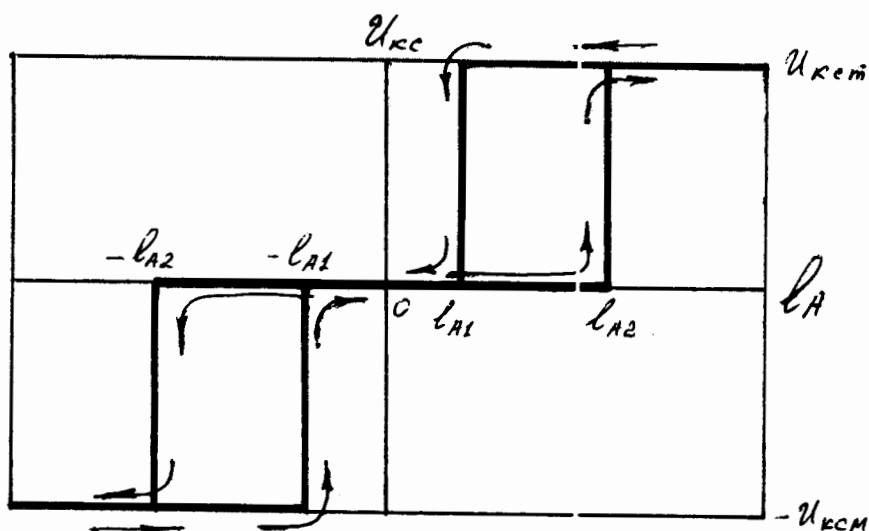


Рис. 4.2. Релейный сигнал управления КС.

где : $-0,5 \leq \nu_{KC} \leq 0,5$, $0 \leq \nu_{A2} \leq 0,5$

$$-\nu_{A2} \leq \nu_{A1} \leq \nu_{A2}$$

$U_{KCT\bar{m}}$ - максимальное значение скорости КС, которое определяется исходя из предельнодопустимого значения скорости изменения реактивности $KC - (dE_{KC}/dt)_{\bar{m}ax}$ по формуле:

$$U_{KCT\bar{m}} = \frac{(dE_{KC}/dt)_{\bar{m}ax}}{0,5 \cdot T \cdot E_{c.c\bar{m}}}$$

$U_{KC}(\tau-0)$ - значение U_{KC} в момент времени, предшествующий данному.

При стабилизации отдельно периода реактора, отдельно уровня мощности, а также при переходе с одного режима на другой сигнал управления вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta(\tau) = C_x \cdot k_x \cdot (1 - \chi_{cp}(\tau)) + C_z \cdot k_z \cdot Z(\tau) \quad (4.13)$$

При управлении одновременно по периоду и уровню мощности используются два выражения : или

$$\Delta(\tau) = k_{xy} \cdot \left(1 - C_{x2} \cdot \frac{y(\tau)}{y^*(\tau)} - \chi_2(\tau) \right) \quad (4.14)$$

или

$$\Delta(\tau) = k_{xy} \cdot \left(1 - C_{xcp} \cdot \frac{y(\tau)}{y^*(\tau)} - \chi_{cp}(\tau) \right) \quad (4.15)$$

При $C_x = 0, C_z = 1$ осуществляется управление только по периоду. При $C_x = 1, C_z = 0$ осуществляется режим стабилизации мощности. При управлении одновременно по периоду и по уровню мощности по достижении определённого уровня мощности (который задается величиной C_{xy}) управление по периоду отключается.

$$C_{x2} = \begin{cases} 1 & \text{при } X_2 < C_{xy} \\ 0 & \text{при } X_2 \geq C_{xy} \end{cases},$$

$$C_{xcp} = \begin{cases} 1 & \text{при } X_{cp} < C_{xy} \\ 0 & \text{при } X_{cp} \geq C_{xy} \end{cases},$$

$$C_{xy} = 0,5 \div 1.$$

$k_x, k_z, k_{xy}, C_x, C_z$ - константы,
 C_{x2}, C_{xcp} - задающее значение обратного периода реактора,
 $y^*(\tau)$ - обратный период разгона реактора,
 $z(\tau)$ - интеграл ошибки периода реактора, (см. (4.20)),
 $X_{cp}(\tau)$ - относительная энергия импульса, определённым образом усреднённая по времени (см. (4.22)),
 $X_2(\tau)$ - сигнал относительной энергии импульса, сглаженный фильтром в виде динамического звена второго порядка (колебательный контур с коэффициентом затухания ξ).

Уравнения фильтра в канале измерения периода записываются в виде:

$$\frac{dX_2(\tau)}{d\tau} = -\frac{2\xi}{T_x} X_2(\tau) + X(\tau) - X_2(\tau) \quad (4.16)$$

$$\frac{dX_2(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_x^2} X_2(\tau) \quad (4.17)$$

Обратный период реактора определяется уравнением:

$$y(\tau = k_m T) = \frac{1}{q \cdot m T} \left[\ln X_2(\tau = k_m T) - \ln X_2(\tau = (k-q)m T) \right] \quad (4.18)$$

в случае применения фильтра, или уравнением

$$y(\tau = k_m T) = \frac{1}{q \cdot m T} \left[\ln X(\tau = k_m T) - \ln X(\tau = (k-q)m T) \right] \quad (4.19)$$

если фильтр не используется.

Здесь \mathcal{Z} - коэффициент затухания, T_x - постоянная времени (с), $X(\tau)$ - относительная энергия импульса (см. (4.21)),

q - количество основных импульсов мощности, принимаемое для формирования усредненного значения обратного периода.

Ошибка обратного периода реактора (разность между заданным и реальным значениями обратного периода) выражается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\mathcal{Z}(\tau)}{d\tau} = y^*(\tau) - y(\tau) \quad (4.20)$$

Относительная энергия импульса находится следующим образом:

$$X(k_m T \leq \tau < (k+1)m T) = \frac{E(\tau = k_m T)}{E^*} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} X_{cp}(k_m T \leq \tau < (k+1)m T) &= X_{cp}((k-1)m T \leq \tau \leq k_m T) + \\ &+ \frac{1}{2} \left[X(k_m T \leq \tau \leq (k+1)m T) - X_{cp}((k-1)m T \leq \tau \leq k_m T) \right] \quad (4.22) \end{aligned}$$

Здесь $E(\tau)$ - энергия текущего импульса мощности,
 E^* - задающее (требуемое) значение энергии импульса
 мощности, τ - константа ($1 \div 100$).

Средняя мощность реактора подсчитывается по следующей формуле

$$P_{cp}(kmT \leq \tau < (k+1)mT) = \frac{1}{mT} \left[\int_{\tau=(k-1)mT}^{\tau=kmT} P_p(\tau) d\tau + \sum_{j=1}^m E(\tau=kmT + T(j-1)) \right] \quad (4.23)$$

5. Особенности алгоритма расчета

В моменты времени $\tau = k \cdot T$ и $\tau = km \cdot T$ ряд функций терпит разрыв, изменяя в этих точках своё значение пропорционально энергии импульса по следующим формулам:

$$P_i(\tau = kT) = P_i(\tau = kT - 0) + \lambda_i \mu_i \cdot E(\tau = kT) \quad (5.1)$$

$$i = 1, 2, \dots, 6,$$

$$Q_{cp}(\tau = kT) = Q_{cp}(\tau = kT - 0) + \alpha_1 \cdot E(\tau = kT) \quad (5.2)$$

$$Q_1(\tau = kT) = Q_1(\tau = kT - 0) + \alpha_1 \cdot E(\tau = kT) \quad (5.3)$$

$$Q_2(\tau = kT) = Q_2(\tau = kT - 0) + \alpha_2 \cdot E(\tau = kT) \quad (5.4)$$

и соответственно пересчитывается мощность источника запаздывающих нейтронов $S(\tau)$ и мощность фона $P_\phi(\tau)$ по формулам (I.4) и (I.7).

Уравнения (I.5), (3.I) + (3.5), (4.I) + (4.5), (4.7) + (4.II), (4.I6), (4.I7), (4.20) образуют систему из 20 обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которая интегрируется с помощью стандартной библиотечной подпрограммы *INTSTP* (используется известный метод Рунге-Кутты). При этом в дифференциальном уравнении (I.5) принимается $P = P_\phi$, так как при интегрировании системы уравнений значения $\tau \neq kT$.

Начальные значения в момент времени $\tau = 0$ задаются следующим образом: считаются известными $P_{cp}(\tau=0)$ - средний уровень мощности в долях от номинальной ($P'_{cp\text{ ном}}(\tau=0) = 1$) и $S_c(0)$ - мощность внешнего источника запаздывающих нейтронов. И далее по формулам вычисляются прочие параметры уравнений:

$$E(0) = \bar{m} \cdot T \cdot (P_{cp} + S_c) \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta_\phi}\right) \quad (5.5)$$

$$\epsilon_\phi(0) = -\epsilon_{опс} - \epsilon_{зн} \quad (5.6)$$

$$S(0-0) = S_c(0) + P_{cp}(0) - \frac{E(0)}{2} \sum_{j=1}^6 \lambda_j \mu_j \quad (5.7)$$

$$S(0+0) = S_c(0) + P_{cp}(0) + \frac{E(0)}{2} \sum_{j=1}^6 \lambda_j \mu_j \quad (5.8)$$

$\epsilon_m(0)$ определяется обратной интерполяцией из условий:

$$K_L = \ln \frac{E(0)}{S(0-0)} \quad \text{и} \quad K_L = f(\epsilon_m) \quad (5.9)$$

$$\Theta_1(c) = t_1^{(0)} + \frac{a_1}{a_2} \cdot P_{cp} + a_1 \frac{E(c)}{2} \quad (5.10)$$

$$t_2(c) = t_1^{(0)} + \frac{a_1 \cdot a_3}{a_2 \cdot a_4} \cdot P_{cp} \quad (5.11)$$

$$\Theta_2(c) = t_2(c) + \frac{a_1}{a_2} \cdot P_{cp} + a_1 \frac{E(c)}{2} \quad (5.12)$$

$$\Theta_{cp}(c) = t_{cp}(c) + \frac{a_1}{a_2} \cdot P_{cp} + a_1 \frac{E(c)}{2} \quad (5.13)$$

$$t_{cp}(c) = \frac{t_1^{(0)} + t_2(c)}{2} \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_\theta(c) = \gamma_\theta \cdot [\Theta_{cp}(c) - t_1^{(0)}] \quad (5.15)$$

$$\varepsilon_t(c) = \gamma_t \cdot [t_{cp}(c) - t_1^{(0)}] \quad (5.16)$$

$$\varepsilon_A(c) = \varepsilon_{kc}(c) = \varepsilon_{bx}(c) = \varepsilon_{ch}(c) = 0 \quad (5.17)$$

$$\Delta_A(c) = w_A^*(c) = v_A^* = \Delta(c) = 0 \quad (5.18)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m(c) - \varepsilon_{cno} - \varepsilon_{xno} - \varepsilon_\theta(c) - \varepsilon_t(c) \quad (5.19)$$

$$X(c) = 1, \quad X_2(c) = 1, \quad Y(c) = 0 \quad (5.20)$$

$$X_{cp}(c) = 1, \quad X_2(c) = 1, \quad Z(c) = 0$$

Затем идет предварительный расчет 200 импульсов мощности для уточнения начальных условий. Далее стержни КС и АР выводятся в заданное начальное положение и начинается решение нужной задачи (переход на другой уровень мощности, скачок реактивности, изменение температуры теплоносителя на входе в активную зону, моделирование аварийных ситуаций и т.д.).

В расчете были приняты следующие значения параметров (для реактора ИБР-2):

$$\begin{aligned} \mu_j &= 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035 \\ \lambda_j &= 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21 \text{ (с)}^{-1} \\ T &= 0,02 \text{ (с)}, \\ S_c &= 0 \\ t_{1c} &= 300^\circ\text{C}, \\ \varepsilon_{\text{ОПО}} &= 16 \beta \\ \varepsilon_{\text{ДПО}} &= 3,5 \beta \\ \gamma_\theta &= -3,8 \cdot 10^{-3} (\beta/^\circ\text{C}) \\ \gamma_t &= -3 \cdot 10^{-3} (\beta/^\circ\text{C}) \\ a_1 &= 100 (^\circ\text{C/с}) \\ a_2 &= 0,1 \text{ (I/с)} \\ a_3 &= 0,71 \text{ (I/с)} \\ a_4 &= 7,5 \text{ (I/с)} \\ \varepsilon_{Am} &= 0,1 \beta \\ \varepsilon_{км} &= 5 \beta \\ \mathcal{U}_{км} &= 2 \cdot 10^{-5} \text{ (I/с)} \\ \xi &= 0,7 \div 1 \\ T_x &= 4 \div 8 \text{ (с)} \\ C_{xy} &= 0,5 \div 1 \\ C_\Delta &= 0 \\ \Delta_1 &= 0,1 \cdot \Delta_{Am} \\ \Delta_{Am} &= 2 \cdot 10^{-1} \div 2 \cdot 10^{-3} \text{ (I/с)} \\ T_{1A} &= 5,00 \text{ (с)} \\ T_{2A} &= 0,04 \text{ (с)} \\ T_{1кc} &= 0,04 \text{ (с)} \\ T_{2кc} &= 5,0 \text{ (с)} \end{aligned}$$

6. Пример работы с программой

Для примера рассмотрим поведение реактора при торможении ДПО в результате нарушения кинематической связи ДПО и ОПО.

Зависимость реактивности ДПО от угла поворота задавалась в виде таблицы. Предполагалось, что скорость ДПО падает по экспоненте:

$$\omega_{\text{ДПО}} = \omega_0 \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{T_\omega}\right) \quad (6.1)$$

с постоянной времени T_ω , значение которой варьировалось (t_0 - начальный момент торможения).

Переходные процессы, обусловленные торможением ДПО, моделировались на ЭВМ БЭСМ-6 на примере реактора, работающего с частотой основных импульсов мощности 5 Гц (при частоте ОПО 50 Гц (рис. 6.1)). При этом исследовалось два режима по уровню мощности:

а) номинальный, т.е. до начала торможения ДПО в реакторе с помощью АР поддерживался номинальный уровень мощности (в качестве номинального значения средней мощности была принята величина 4 МВт). Для этого уровня характерно существенное влияние температурных обратных связей;

б) режим 0,01% от номинального, когда температурная обратная связь себя не проявляет.

На рис. 6.2 отражено поведение реактора, работающего на номинальном уровне мощности, при экспоненциальном падении скорости ДПО с постоянной времени $T_\omega = 100$ с и "быстром" регуляторе ($T_{1A} = 1$ с).

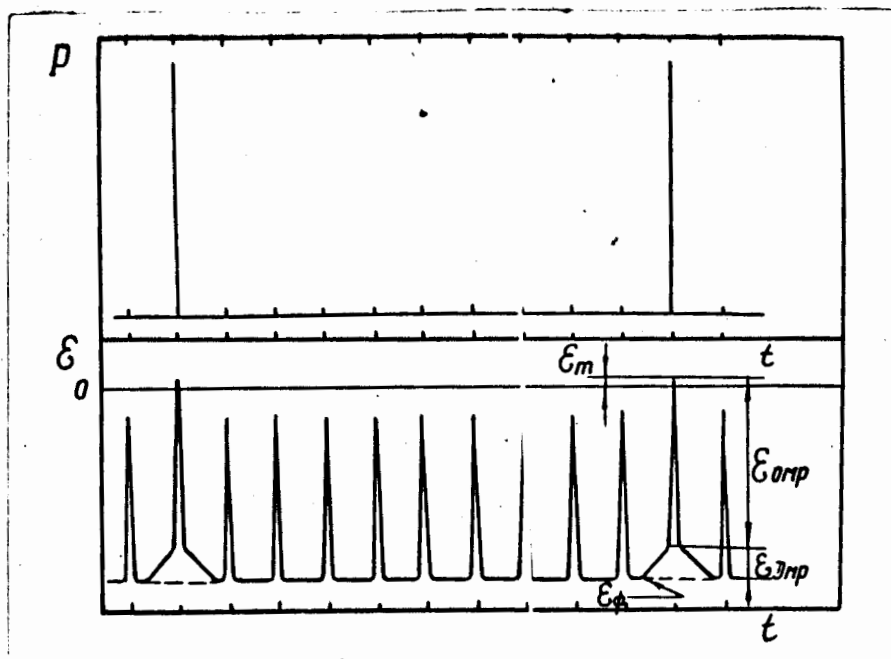


Рис.6.1. Образование импульсов мощности реактора.

P - мощность, ϵ - реактивность реактора на мгновенных нейтронах, ϵ_m - величина надкритичности на мгновенных нейтронах, обеспечивающая постоянство амплитуд основных импульсов мощности, ϵ_ϕ - реактивность фона, $\epsilon_{опо}$ и $\epsilon_{доп}$ соответственно эффективности основного и дополнительного модуляторов, τ - время.

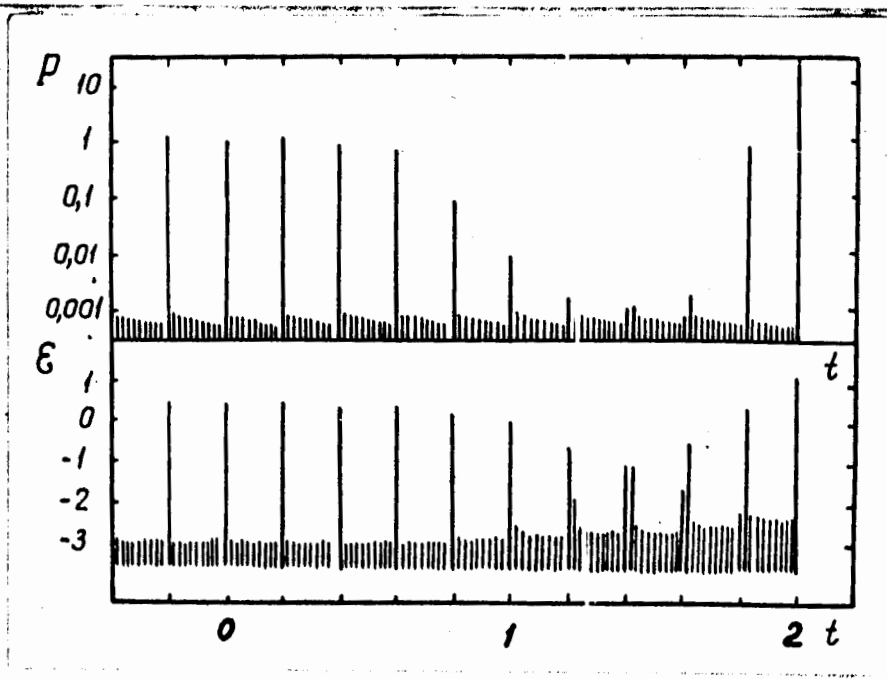


Рис.6.2. Переходные процессы при экспоненциальном падении скорости ДЮ с постоянной времени 100 сек.

P - мощность в долях от номинального уровня,
 ϵ - реактивность реактора в долях β .

После начала торможения ДПО происходит спад реактивности, так как нарушается совпадение максимумов ^{реактивности} ОПО и ДПО. В результате этого происходит резкий спад амплитуд основных импульсов мощности и, следовательно, температуры топлива, что в свою очередь ведёт к уменьшению модуля отрицательной температурной реактивности. То есть в систему начинает ^{в)}приноситься реактивность, ранее компенсировавшаяся благодаря разогреву реактора. Кроме того в связи с падением амплитуд основных импульсов мощности и регулятор начинает вводить в систему дополнительную реактивность с помощью регулирующих стержней.

Нарастание угла рассогласования приводит к тому, что импульс реактивности, обусловленный дополнительным модулятором, смещаясь, начинает накладываться на импульс реактивности ОПО, который обуславливал раньше первый побочный импульс. То есть основной импульс мощности и первый после него сателлит начинают меняться ролями. Таким образом, в результате остывания реактора (а также работы регулятора) реактивность фона становится настолько большой к моменту полного или почти полного совмещения ДПО и ОПО напротив активной зоны, что амплитуда первого побочного импульса мощности становится во много раз больше амплитуды основного импульса, соответствующей установившемуся режиму.

Результаты моделирования для случая, когда реактор до рассинхронизации работал на номинальном уровне мощности, отражены в таблице. Аналогичные результаты получаются и для реактора, работающего на низком уровне мощности. Однако, рост амплитуд импульсов в этом случае более плавный, поскольку он является следствием только работы регулятора, увеличивающего реактивность.

Т а б л и ц а

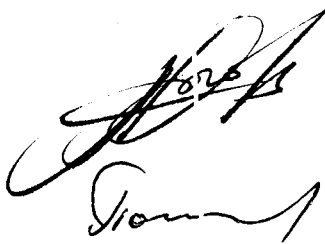
| Постоянная времени торможения ДПО в сек | 60 | 100 | 300 | 1000 |
|---|-----|-------|-----|-------|
| Кратность превышения амплитуды первого сателлита над номиналь- ным значением амплитуды основ- ного импульса мощности ж | 15 | 24 | 21 | 7,7 |
| Промежуток времени в сек с момента торможения до появле- ния сателлита аварийной амплитуды | 1,6 | 2 | 3,2 | 5,4 |
| Угол рассогласования между ДПО и ОПО в градусах в момент возникновения аварийного импульса | - 3 | - 0,5 | 5 | - 9,6 |

ж) Первая цифра относится к более быстрому регулятору ($T'_{1A} = 1$ с),
вторая - к более медленному ($T'_{1A} = 5$ с).

Таким образом можно сделать следующие выводы:

1. Из исследования поведения реактора при торможении ДПО видно, что амплитуда побочного импульса мощности становится во много раз больше амплитуды основного импульса, соответствующего нормальному режиму работы, по истечении сравнительно короткого промежутка времени. Как видно из таблицы, при номинальном уровне мощности для постоянных времени торможения от 60 до 1000 сек (без учета аз) авария наступает через $1,6 \pm 5,4$ сек после начала торможения.

2. Регулятор с большей скоростью передвижения способствует усугублению аварии.



Handwritten signature, possibly reading "Горюхи" or similar, followed by a flourish.

Приложение 1

Текст программы SINIBR
на ФОРТРАНЕ

```

PROGRAM DINIBR(INPUT,OUTPUT,TAPE5=OUTPUT)
DIMENSION TK(56),AK(56),Y(20),F(20)
DIMENSION SS(100,27)
COMMON/ABC/S,SC,EQ,AQ,FT,AT,T10,EAK,EARM,EKC,EKCM,F0,EC,T1,A1,A2,
1 A3,A4,A5,TT,DT1,P,T1AK,T2AR,T1KC,T2KC
COMMON/CXX/XCP,YY,DEA,UKC,YPER,XR,ZAT,TZ,TX,INER,INER1
COMMON/TT/AMM(6),ALL(6)
EXTERNAL EXTERN
NAMELIST/YUT/K,T,Y
NAMELIST/NN/N,MY,KEBX,NP
DATA(DAM=2.E-1),(D1=2.E-2),(CXY=0.5),(CX=1.),(CZ=0.),(CXZ=1.)
+ ,(CXCP=1.),(ZAT=1.),(TX=4.),(UKCM=2.E-4),(ALA1=.1),(ALA2=0.25)
+ ,(TZ=1.),(CD=0.),(INER=1),(INER1=1),(KI=0),(RR=1.),(NP=100)
+ ,(KQ=10),(PCP=1.),(EARM=0.1),(EKCM=5.),(T1AR=0.5),(T2AR=.04)
+ ,(T1KC=0.5),(T2KC=.04),(DKOPC=16.),(DKOPD=3.5),(H=.051),(T1=.2X
+),(PI=3.14159265),(TP=.02),(SC=1.E-10),(AQ=-3.8E-3),(AT=-3.E-3)
+ ,(T10=300.),(A1=100.),(A2=0.1),(A3=.71),(A4=7.5),(EEE=.183)
+ ,(NNY=20),(DKBX=0.02),(F0=-18.9),(E=0.2),(EEE=0.2),(KPX=8)
DATA(AMM=.0387,.2800,.216,.328,.103,.035)
DATA(ALL=.0129,.0311,.134,.331,1.26,3.21)
DATA(TK=1.9586E-4,1.9886E-4,2.0197E-4,2.0520E-4,2.0856E-4,2.12 5
1E-4,2.1569E-4,2.1949E-4,2.2346E-4,2.276E-4,2.3195E-4,2.3651E-4,
2 2.4129E-4,2.4633E-4,2.5165E-4,2.5726E-4,2.6321E-4,2.6952E-4,
3 2.7624E-4,2.8341E-4,2.9109E-4,2.9933E-4,3.0823E-4,3.1786E-4,
4 3.2834E-4,3.3981E-4,3.5243E-4,3.6642E-4,3.8203E-4,3.9963E-4,
5 4.1968E-4,4.4280E-4,4.6988E-4,5.0217E-4,5.4154E-4,5.919E-4,
6 6.5498E-4,7.4197E-4,8.6691E-4,1.0597E-3,1.385E-3,1.9957E-3,3.2908E
7E-3,6.4206E-3,1.504E-2,4.1784E-2,1.3208E-1,4.3217E-1,1.2121 ,
8 2.4748,3.8361,5.0622,6.1195,7.033,7.8328,8.5428 )
EART=-1.E-2/2.3E-3
DO 2 JK=1,56
TK(JK)=ALOG(TK(JK))
AK(JK)=EART
2 EART=EART+2.5E-4/2.3E-3
IVAR=1
14 CONTINUE
READ 10,N,MY,KEBX,NP
10 FORMAT(4I3)
N = 400
A5 = 1.
T1=T10+A5*(1.-EXP(-T/TT))
DT1=(A5/TT)*EXP(-T/TT)
SC = 0.
MX=SS/4Y
NP = 150
EEE = 0.02
E = 0.02
T1 = T10
GKSM = 0.035
GARM = 0.035
UKCM = GKSM/(.5*PI*EKCM)
DAM = GARM/(.5*PI*EARM)
DT1 = 0.

```

***** INITIAL CONDITIONS *****
***** Y(1) - Y(6) - THE POWER OF DELAQUED-NEUTRONS
***** Y(7) - THE AVERAGE TEMPERATURE OF FUEL
***** Y(8) THE TEMPERATURE OF FUEL ROD ON BOTTOM END

C***** Y(9) - THE TEMPERATURE OF FUEL ROD ON TOP END
 C***** Y(10) - THE AVERAGE TEMPERATURE OF SODIUM COOLANT
 C***** Y(11) - THE TEMPERATURE OF COOLANT ON OUTPUT
 C***** Y(12) - THE DISPLACEMENT OF AUTOMATIC CONTROL ROD
 C***** Y(13) - THE VELOCITY OF AUTOMATIC CONTROL ROD
 C***** Y(14) - DELAY OF AUTOMATIC ROD
 C***** Y(15) - THE DISPLACEMENT OF COMPENSATION ROD
 C***** Y(16) - THE VELOCITY OF COMPENSATION ROD
 C***** Y(17) - THE DELAY OF COMPENSATION ROD
 C***** Y(18) - THE RELATIVE ENERGY OF PULSE AFTER FILTER
 C***** Y(20) - THE ERROR IN OF REACTOR PERIOD

$$PCP = E / (TP * MX * (1. + 1./E0)) - SC$$

$$AJ = 1. / (12. * A4)$$

$$A12 = (A1/A2) * PCP + A1 * E / 2.$$

$$Y(8) = A12 + T10$$

$$Y(11) = A1 * A3 * PCP / (A2 * A4) + T10$$

$$Y(9) = A12 + Y(11)$$

$$Y(10) = .5 * (T10 + Y(11)) - DT1 * AJ + A3 * AJ * (Y(8) - T10 - Y(9) + Y(11))$$

$$Y(7) = A12 + Y(10)$$

DO 105 J=1,9

105 Y(J+11) = 0.

$$EAR = .5 * EARM * SIN(PI * Y(12))$$

C***** EAR - THE EFFECTIVITY OF AUTOMATIC CONTROL ROD

C***** EKC - THE EFFECTIVITY OF COMPENSATION ROD

$$EKC = .5 * EKCM * SIN(PI * Y(15))$$

C***** THE REACTIVITY EFFECT OF FUEL

$$EQ = AQ * (Y(7) - T10)$$

C***** THE REACTIVITY EFFECT OF SODIUM COOLANT

$$ET = AT * (Y(10) - T10)$$

$$SU = 0.$$

DO 106 J=1,6

106 SU = SU + ALL(J) * AMM(J)

$$S = SC + PCP - E * SU / 2.$$

$$R = ALOG(E/S)$$

CALL PARINV(R, TK, AK, 56, ABU)

$$XK = 1. / (50. * PI * EARM * MX * TP)$$

$$EC = ABU - DKOP0 - DKDPO - EKC - EQ - ET$$

$$EQ = EC + EKC + ET + EQ$$

PRINT 158, E, S, R, ABU, EC, EQ, EAR, EKC, EQ, ET, ET1

158 FORMAT(11E11.3/)

PRINT 13, Y

$$P = -S / EQ$$

DO 106 J=1,6

100 Y(J) = AMM(J) * PCP + E * AMM(J) * ALL(J) / 2.

$$XX = E / EEE$$

$$XCP = XX$$

$$XP = XX$$

$$T = 0.0$$

$$ST1 = 0.0$$

$$ST2 = 0.0$$

$$KEBX = 1$$

$$M = MX$$

$$SO = S$$

PRINT 12

12 FORMAT(1H ,40X,43H*** I N I T I A L C O N S T A N T S *** ,//
 + 3X,13H== THERMAL ==,6X,35H== CONTROL AND COMPENSATION RODS ==,10X
 2,28H== AUTOMATIC AND REGULATE ==,8X,13H== KINETIC == (/)

```

      PRINT 11,T10,EARM,EKCM,EEE,TZ,PCP
+      ,A1,T1AR,T1KC,YPER,CD,DKDPO
+      ,A2,T2AR,T2KC,CXY,INER,DKDPO
+      ,A3,DAM,UKCM,CXZ,INER1,H
+      ,A4,D1,ALA1,CXCP,RR,SC
+      ,AQ,CX,ALA2,ZAT,TT,SC
+      ,AT,CZ,ABU,TX,KQ,E
11  FORMAT (2X,
15HT10= ,E11.3,2X,7HEARM = ,E11.3,2X,7HEKCM = ,E11.3,2X,7HEEE = ,
2E11.3,2X,7HTZ = ,E11.3,2X,7HPCP = ,E11.3/
22X,5HA1 = ,E11.3,2X,7HT1AR = ,E11.3,2X,7HT1KC = ,E11.3,2X,7HYPER =X
3 ,E11.3,2X,7HCD = ,E11.3,2X,7HDKDPO= ,E11.3/
42X,5HA2 = ,E11.3,2X,7HT2AR = ,E11.3,2X,7HT2KC = ,E11.3,2X,
47HCXY = ,E11.3,2X,7HINER = ,E11.3,2X,7HDKDPO= ,E11.3/
52X,5HA3 = ,E11.3,2X,7HDAM = ,E11.3,2X,7HUKCM = ,E11.3,2X,
57HCXZ = ,E11.3,2X,7HINER1= ,E11.3,2X,7HH = ,E11.3/
62X,5HA4 = ,E11.3,2X,7HD1 = ,E11.3,2X,7HALA1 = ,E11.3,2X,
67HCXCP = ,E11.3,2X,7HRR = ,E11.3,2X,7HSC = ,E11.3/
72X,5HAG = ,E11.3,2X,7HCX = ,E11.3,2X,7HALA2 = ,E11.3,2X,
77HZAT = ,E11.3,2X,7HTT = ,E11.3,2X,7HSS = ,E11.3/
82X,5HAT = ,E11.3,2X,7HCZ = ,E11.3,2X,7HEMAX0= ,E11.3,2X,
87HTX = ,E11.3,2X,7HK0 = ,E11.3,2X,7HEC = ,E11.3///)
      PRINT 15
15  FORMAT(1H ,33X,47H**** I N I T I A L C O N D I T I O N S ****//)
+ / 2X,50(1H=),23H T = 3 SEK,Y(I), I=1,2( ,50(1H=)//)
      NNY = 20

C
C      THE BEGIN INTEGRATION OF SISTEM DINAMIC EQUATIONS
C

      DO 3 K=1,N
5  CONTINUE
      CALL INTSTP(NNY,H,T,Y,EXTERN)
      IF(T.LT.(TP*FLOAT(K)))GO TO 5
      EBX = 0.
      IF(K.LT.NP)GO TO 4
      EBX = OKBX
4  CONTINUE
      EDPO = 0.
      IF(K.NE.M)GO TO 6
      EDPO = DKDPO
      M = M + MX
6  CONTINUE
      EQ = AQ*(Y(7) - T10)
      ET = AT*(Y(10) - T10)
      IF(Y(12).LE.(-.5))Y(12) = -0.5
      IF(Y(12).GE.0.5)Y(12) = 0.5
      IF(Y(15).GE.0.5)Y(15) = 0.5
      IF(Y(15).LE.(-0.5))Y(15) = -.5
      AL = Y(12)
      UKC = 0.
      IF(AL.GE.ALA2.AND.Y(13).GT.0.)UKC = UKCM
      IF(AL.GE.ALA1.AND.Y(13).LT.0.AND.UKCP.NE.0.)UKC = UKC1
      IF(AL.LE.-ALA1.AND.Y(13).GT.0.AND.UKCP.NE.0.)UKC = -JKCM
      IF(AL.LE.-ALA2.AND.Y(13).LT.0.)UKC = -UKCM
      UKCP = UKC
      DEA1 = CX*Y(1) + CZ*Y(20)
      CX2 = 1.

```

```

IF (Y(19).GE.CXY) CX2 = 0.
CXP = 1.
IF (XCP.GE.CXY) CXCP = 0.
DX = DEA1 - CD*D1
IF (ABS(DEA1).LE.D1) DEA = 0.
IF (ABS(DEA1).GT.D1.AND.ABS(DX).LT.DAM) DEA = DX
IF (DX.GE.DAM) DEA = DAM
IF (DX.LE.-DAM) DEA = -DAM
C***** DEA - THE OPERATE SIGNAL WITH LIMITATIONS
C***** DEA1 - THE SIGNAL OF CONTROL ROD
      EAR = .5*EARM*SIN(PI*Y(12))
      EKC = .5*EKCM*SIN(PI*Y(15))
      EQ=EC+EAR+EKC+EQ+ET
C***** EQ - THE PHONE-REACTIVITY
      S = 0.
      DO 102 J=1,6
102  S = S + Y(J)
      S = S + SC
      P=-S/EQ
      PSX = (PF + P)*TP/2.
      Y7 = Y(7)
      Y8 = Y(8)
      Y9 = Y(9)
      SDO = S
      ET1=E0+DKOP0+EDPO+EBX
      IF (ET1.GE.AK(1)) GO TO 141
      E=0.0
      GO TO 142
141  CONTINUE
      CALL PARINV(ET1,AK,TK,56,R)
      R=EXP(R)
      E=S*R
C***** E - THE ENERGY OF PULSE (AS DELTA-FUNCTION)
C***** S - THE POWER OF SOURCES OF NEUTRONS
C***** SC - THE POWER OF EXTERNAL SOURCE
C***** T - THE PERIOD OF REACTIVITY PULSES
142  CONTINUE
      SI1=SI1+ABS(E-EEE)
      SI2=SI2+(E-EEE)**2
      DO 103 J=1,6
103  Y(J) = Y(J) + ALL(J)*AMM(J)*E
      A1X = A1*E
      Y(7) = Y(7) + A1X
      Y(8) = Y(8) + A1X
      Y(9) = Y(9) + A1X
      S = 0.
      DO 104 J=1,6
104  S = S + Y(J)
      S = S + SC
      EQ = A0*(Y(7) - T10)
      ET = AT*(Y(10) - T10)
      EQ=EC+EAR+EKC+EQ+ET
      P=-S/EQ
      PP = P
      PSR = FSR + PSX + E
      IF (EDPO.EQ.0.) GO TO 3
      KI = KI + 1

```

```

IMAX = KI
XX = E/EEE
XR = XX
XCP = XCP + (XX - XCP)/RR
YY = (ALOG(XX) - ALOG(XP))/(KQ*MX*TP)
IF (MOD(KI,KQ).EQ.0) XP = XX
PSR = PSR/(TP*MX)
ELO=ALOG10(E)
SS(KI,1) = T - 0.001
SS(KI,2) = E
SS(KI,3) = ELO
SS(KI,4) = XX - 1.
SS(KI,5) = PSR
SS(KI,6) = Y(2)
SS(KI,7) = Y7
SS(KI,8) = Y(7)
SS(KI,9) = Y(10)
SS(KI,10) = Y(12)
SS(KI,11) = Y(15)
SS(KI,12) = ET1
SS(KI,13) = EAR
SS(KI,14) = EKC
SS(KI,15) = EQ + ET
SS(KI,16) = SDO
SS(KI,17) = S
SS(KI,18) = EBX
SS(KI,19) = Y8
SS(KI,20) = Y(8)
SS(KI,21) = Y9
SS(KI,22) = Y(9)
SS(KI,23) = T1
SS(KI,24) = Y(11)
SS(KI,25) = EQ
SS(KI,26) = ET
PSR = 0.
3 CONTINUE
PRINT 205
205 FORMAT (/ / 10X,9HTIME(SEK),8X,1HE,10X,5HLN(E),9X,3HX-1,10X,4HP-SR,
+ 10X,1HY,4X,12HT-SR(BEFORE),2X,1LHT-SR(AFTER),4X,10HT-NA(AVER) // )
DO 200 I=1,IMAX
200 PRINT 201,I,(SS(I,II),II=1,9)
201 FORMAT(I5,9F13.5)
PRINT 206
206 FORMAT (/ / 10X,9HTIME(SEK),6X,4HL-AR,9X,4HL-KC,8X,5HE-MAX,8X,5HE-AR
+ ,8X,5HE-KC,9X,5HEQ+ET,7X,8HS-BEFORE,6X,8HS-AFTER // )
DO 202 I=1,IMAX
202 PRINT 201,I,SS(I,1),(SS(I,II),II=10,17)
PRINT 207
207 FORMAT (/ / 10X,9HTIME(SEK),5X,4HE-BX,3X,10HTF1-BEFORE,2X,9HTF1-AFTER
+ ,2X,10HTF2-BEFORE,2X,9HTF2-AFTER,2X,11HT-NA(INPUT),3X,12HT-NA(OUT
+ PUT),3X,6HE-FUEL,3X,8HE-SODIUM / )
DO 203 I=1,IMAX
203 PRINT 204,I,SS(I,1),(SS(I,II),II=18,26)
204 FORMAT(I5,10F12.5)
PRINT 13,Y
13 FORMAT(6F20.10 / )
SI3=SI1/EEE

```



```

SUBROUTINE EXTERN(T,Y,F)
DIMENSION Y(20),F(20)
COMMON/ABC/S,SC,EQ,AQ,ET,AT,T10,FAR,EARM,EKC,FKCM,ED,EC,T1,A1,A2,
1 A3,A4,A5,TT,DT1,P,T1AR,T2AR,T1KC,T2KC
COMMON/TT/AMM(6),ALL(6)
COMMON/CXX/XCP,YY,DEA,UKC,YPER,XR,ZAT,TZ,TX,INER,INER1
C***** NEUTRON KINETIC EQUATIONS *****
DO 1 J=1,6
1 F(J) = ALL(J)*(AMM(J)*P - Y(J))
C***** THERMAL CONDUCTION AND TRANSFER EQUATION *****
C***** T1 - THE TEMPERATURE OF COOLANT ON INPUT
C***** DT1 - THE GRADIENT OF TEMPERATURE OF COOLANT
XX = A1*P
F(7) = XX - A2*(Y(7) - Y(1))
F(8) = XX - A2*(Y(8) - T1)
F(9) = XX - A2*(Y(9) - Y(11))
F(10) = A3*(Y(7)-Y(10))+A4*(T1-Y(11))
F(11) = 12.*A4*Y(10) - 6.*A4*(T1 + Y(11)) + DT1
+ - A3*(Y(8) - T1) + A3*Y(9) - Y(11))
C***** THE AUTOMATIC CONTROL ROD EQUATIONS *****
F(12) = Y(13)
IF(INER.EQ.1)F(13) = (Y(14) - Y(13))/T2AR
IF(INER.EQ.0)Y(13) = Y(14)
F(14) = (DEA - Y(14))/T1AR
C***** THE COMPENSATION CONTROL ROD EQUATIONS *****
F(15) = Y(16)
IF(INER1.EQ.1)F(16) = (Y(17) - Y(16))/T2KC
IF(INER1.EQ.0)Y(16) = Y(17)
F(17) = (UKC - Y(17))/T1KC
C***** THE REACTOR AUTOMATIC REGULATION EQUATIONS *****
F(18) = XR - 2.*ZAT*Y(18)/TZ - Y(19)
F(19) = Y(18)/(TX*TX)
C***** PRESET OF REACTOR PERIOD, AND THAN POWER LEVEL
F(20) = YPER - YY
C***** YY - THE REACTOR PERIOD (FLOWING)
C***** YPER - THE PRESET OF PERIOD REACTOR
RETURN
END

```