

УДК 681.5

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВЭР-1200

С.С. Правосуд^{1,2}, Д.С. Маслаков², Я.О. Якубов²

¹АНО ДПО Техническая академия Росатома, Обнинск, 249031, Россия

²Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ», Северск, 636036, Россия

*e-mail: ssepravosud@rosatom.ru

*e-mail: sspravosud@mephi.ru

Поступила в редакцию: 11.12.2023

После доработки: 18.02.2024

Принята к публикации: 05.03.2024

В данной работе смоделированы нечеткий и нечеткий ПИ-регуляторы системы автоматического регулирования мощности линеаризованной математической модели реакторной установки ВВЭР-1200. Непосредственно контур системы автоматического регулирования включает в себя математическую модель шагового электромагнитного привода, модель датчиков потока нейтронов, а также уточненную математическую модель 12 группы органов регулирования системы управления и защиты, полученную путем аппроксимации экспериментальных данных алгоритмом Левенберга–Марквардта для нелинейного метода наименьших квадратов. На основе модели в пространстве состояний ядерного реактора было также определено 10 передаточных матриц, соответствующих диапазону мощности 10–100 % от номинальной и спроектировано 10 классических ПИ-регуляторов для обеспечения запасов устойчивости не менее 60° по фазе, и не менее 10 децибел по амплитуде для каждого уровня мощности реакторной установки. Результаты моделирования показывают значительное преимущество разработанных нечетких регуляторов как в режиме астатического поддержания мощности с учетом шумов в канале датчиков потока нейтронов, так и в режимах следования за нагрузкой.

Ключевые слова: автоматическое регулирование мощности, нечеткая логика, нечеткий регулятор, нечеткий ПИ-регулятор, ВВЭР-1200, передаточная функция, пространство состояний, робастность.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.320

EDN QBFVFE

ВВЕДЕНИЕ

Ядерный реактор на тепловых нейтронах представляет собой сложный нелинейный объект управления (ОУ), контроль которого осложняется постоянным изменением во времени и в пространстве параметров, сопряженных с процессами выгорания ядерного топлива и воспроизводством вторично делящихся нуклидов, накоплением продуктов деления, приводящих к шлакованию и отравлению, теплогидравлическим процессам, а также эффектам реактивности различной природы. Большое влияние на устойчивость реактора как объекта управления оказывает и режим его работы: например, постоянные циклы нагрузки в широком диапазоне изменения мощностей сильно отражаются на производительности АЭС. Дополнительную неопределенность в процесс управления вносят также шумы датчиков аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) реактора и, как

следствие, неопределенность сигнала для исполнительного механизма (ШЭМ), осуществляющего возвратно-поступательное движение органов регулирования системы управления и защиты реактора (ОР СУЗ). Ко всем вышеперечисленным сложностям следует добавить то, что существует проблема неопределенности самой разработанной математической модели объекта управления: задание объекта в виде передаточной функции или в виде пространства состояний, т.е. в виде, пригодном для синтеза регулятора мощности (АРМ), позволяет описывать только изменчивые во времени свойства системы, исключая из рассмотрения их пространственное распределение. Для разрешения последней задачи были предложены, среди прочих, методы локальной кинетики [1], предполагающие разбиение реактора на несколько зон управления, каждая из которых описывалась моделью точечной кинетики и взаимодействовала с соседней по заданному закону. В работе

[2] Г.А. Пикина и др. разработали модель динамики реактора ВВЭР, пригодную для синтеза САР, с учетом распределения по высоте активной зоны параметров теплоносителя и теплового потока от реакции деления, а также с учетом влияния на переходные процессы неактивного металла, объема воды под и над активной зоной, и получили передаточные функции по основным каналам. Тем не менее, в подавляющем большинстве случаев при синтезе регулятора мощности ограничиваются только моделью точечной кинетики, дополненной обратными связями по реактивности.

Как следствие из обозначенных выше нетривиальных задач синтеза САР, традиционные ПИ-регулятор [2, 3] или ПИД-регулятор [4] не могут обеспечить желаемую точность и надежность системы управления в силу неадаптивности параметров K_P, K_I, K_D , так как известно, что передаточная функция, полученная на основе модели точечной кинетики, содержит множитель P_0 – текущий уровень мощности реакторной установки [5]. Для того чтобы избежать нормирования коэффициентов регулятора на текущий уровень мощности, такую передаточную функцию часто принимают в относительном виде, однако при использовании более сложных моделей, учитывающих процессы нагрева топливных элементов, а также процессы теплопередачи от топлива к теплоносителю, необходимость в нормировке остается, что будет показано далее. Для улучшения производительности классического ПИД-регулятора в работе [6] М. Зареи использует в качестве настройки метод Циглера–Никольса, однако известно, что данный метод не учитывает требование к запасу устойчивости. Таким образом, крайне важной задачей остается усовершенствование стратегий управления реакторной установкой, что позволит повысить ее безопасность.

К современным стратегиям управления реакторной установкой можно отнести, например оптимальное управления на основе линейно-квадратичного регулятора [7] (LQR) или линейно-квадратичного гауссова регулятора (LQG) [8], которые позволяют достичь желаемых результатов. Стратегии на основе $\mathcal{H}_\infty$ -управления были также разработаны для системы управления мощностью РУ и обеспечения повышенной устойчивости по сравнению с LQG [9]. Управление с прогнозирующей моделью было представлено в [10]: основная идея заключалась в реализации такого закона управления, который

не учитывал бы какую-либо явную модель процесса, а использовал лишь данные «вход–выход». Отдельно следует отметить управление на основе нечеткой логики (Fuzzy Logic Control), к безусловным достоинствам которой можно отнести ее широкое использование для управления системами, в которых трудно или невозможно определить точные значения параметров; поэтому спроектированный регулятор можно использовать даже при существенных изменениях коэффициентов модели из-за различных физических процессов. Более того, в отличие от вышеперечисленных стратегий, FLC опирается на простые математические принципы и требует только знания лингвистических переменных для процессов фаззификации, нечеткого вывода и дефаззификации. При этом FLC может обеспечить лучшие показатели качества управления по сравнению, например, с MPC: в работе [11] разработанный контроллер на основе нечеткой логики продемонстрировал меньшие среднеквадратичное отклонение (RMSE) и среднюю абсолютную ошибку (MAE) для управления электрическим двигателем с двойным питанием.

Нечеткий ПИД-регулятор (F-PID) был спроектирован для различных режимов нагрузки реакторов PWR [12, 13] и для управления реактором космического аппарата [14]. В работе [15] для управления жидкосолевым реактором В. Зэнг и др. была предложена схема управления на комбинировании классического ПИД (в динамическом режиме) и нечеткого (для небольшого отклонения от стационарного значения) регуляторов. В [16] Д. Ачария и др. использовали тот же подход для жидкосолевого реактора, но комбинируя нечеткий и ПИ-регулятор.

В данной работе смоделированы в среде MATLAB нечеткий и нечеткий ПИ-регуляторы контура системы автоматического регулирования мощности линеаризованной модели динамики реактора ВВЭР-1200, обеспечивающие как режим астатического поддержания мощности с учетом шумов, так и управление реактором в переходных режимах.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА

Типовая система автоматического регулирования мощности реакторной установки может быть представлена как на рис. 1 [9, 15, 17].

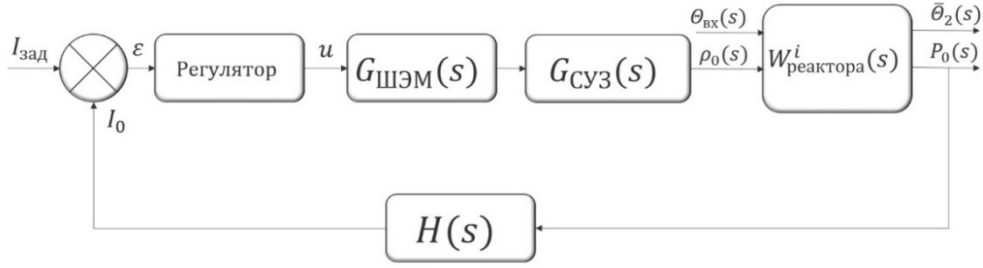


Рис. 1. Типовая система автоматического регулирования мощности ядерного реактора:

$G_{ШЭМ}(s)$ – передаточная функция шагового электромагнитного привода; $G_{СУЗ}(s)$ – передаточная функция 12 групп ОР СУЗ; $H_{дат}(s)$ – обобщенная передаточная функция датчиков потока нейтронов;

$W_{реактора}^i(s)$ – передаточная матрица реактора на i -м уровне мощности

Шаговый электромагнитный привод является сложной электромеханической системой, в которой каждый шаг сопровождается переходными процессами в обмотках электродвигателя, а перемещение якоря вызывает изменение магнитной проводимости, которое влияет на переходные процессы в обмотках управления. В то же время, якорь двигателя может совершать колебания со значительной амплитудой. Перемещение массивных частей магнитной системы в герметичных чехлах ШЭМ приводит к появлению вихревых токов, сильно влияющих на характер переходных процессов. В работе [18] К.Ю. Щукиным получена передаточная функция такого электромагнита с учетом короткозамкнутых витков, которая может быть представлена выражением (1):

$$G_{ШЭМ}(s) = 0.4 \frac{0.011s + 1}{(0.19s + 1)(0.00113s + 1)}, \quad (1)$$

Обобщенную передаточную функцию датчиков потока нейтронов определим как апериодическое звено (2) [9, 15]:

$$H_{дат}(s) = \frac{1}{s + 1}. \quad (2)$$

В качестве математической модели ядерного реактора используется верифицированная в двух тестах модель динамики реактора со сосредоточенными параметрами [19], использующая подход Р. Манна: однофазный теплоноситель находится в двух последовательно соединенных узлах («two well-stirred tanks in series»), что предполагает равенство между выходной температурой теплоносителя из данных узлов и их средней температурой как представлено в системе (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(T, \Theta) - \beta}{\Lambda} P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i^*(t), \\ \frac{dC_i^*(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i^*(t), \\ m_T \gamma_T \frac{d\bar{T}(t)}{dt} = \varepsilon P(t) - K_{тепл} S_{пов} (\bar{T}(t) - \bar{\Theta}_1(t)), \\ m_{ТН1} \gamma_{ТН} \frac{d\bar{\Theta}_1(t)}{dt} = \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{тепл} S_{пов}}{2} (\bar{T}(t) - \bar{\Theta}_1(t)) - G_{ТН} \gamma_{ТН} (\bar{\Theta}_1(t) - \theta_{вх}), \\ m_{ТН2} \gamma_{ТН} \frac{d\bar{\Theta}_2(t)}{dt} = \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{тепл} S_{пов}}{2} (\bar{T}(t) - \bar{\Theta}_1(t)) - G_{ТН} \gamma_{ТН} (\bar{\Theta}_2(t) - \bar{\Theta}_1(t)), \\ \rho(T, \Theta) = \rho + \alpha_T^T (\bar{T}(t) - \bar{T}_0) + \frac{\alpha_{ТН}^T}{2} (\bar{\Theta}_1(t) - \bar{\Theta}_{10}) + \frac{\alpha_{ТН}^T}{2} (\bar{\Theta}_2(t) - \bar{\Theta}_{20}), \end{array} \right. \quad (3)$$

где P – тепловая мощность ядерного реактора (МВт); C_i^* – нормированная на мощность концентрация ядер – предшественников запаздывающих нейтронов (МВт); $\bar{T}$ – среднее значение температуры топливных элементов (°C); $\bar{\Theta}_1$ и $\bar{\Theta}_2$ – среднее значение температур первого и

второго узлов теплоносителя (°C); Λ – время жизни нейтронов (с); ρ – реактивность, вносимая ОР СУЗ; β – суммарная доля запаздывающих нейтронов $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$; λ_i – постоянная распада i -й группы ядер – предшественников запаздывающих нейтронов (с⁻¹); ε – доля энер-

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВЭР-1200

гии, выделяющаяся непосредственно в топливе ($\sim 97\%$); $S_{\text{пов}}$ – площадь поверхность теплообмена (м^2); $K_{\text{тепл}}$ – коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю ($\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{°C}}$); m_{T} – масса топливных элементов (кг); γ_{T} – удельная теплоемкость топливных элементов ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг °C}}$); $G_{\text{ТН}}$ – массовый расход теплоносителя через реактор ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$); $m_{\text{ТН1}}, m_{\text{ТН2}}$ – масса теплоносителя в первом и втором узлах (кг); $\gamma_{\text{ТН}}$ – удельная теплоемкость теплоносителя ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг °C}}$); $\alpha_{\text{T}}^{\text{T}}$ – коэффициент реак-

тивности по температуре топлива ($\frac{1}{\text{°C}}$); $\alpha_{\text{ТН}}^{\text{T}}$ – коэффициент реактивности по температуре теплоносителя ($\frac{1}{\text{°C}}$).

В работе [19] также показано преимущество данного подхода перед традиционной моделью динамики, где температура теплоносителя в активной зоне принимается равной полусумме входной и выходной температур на примере теста с резким увеличением температуры теплоносителя на входе в активную зону. Параметры, используемые при моделировании, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры реактора, использованные при моделировании

Параметр	Численное значение
Массовый расход теплоносителя ($G_{\text{ТН}}$)	19000
Масса топлива (m_{T})	86000
Масса теплоносителя в АЗ ($m_{\text{ТН}} = m_{\text{ТН1}} + m_{\text{ТН2}}$)	6000
Коэффициент теплопередачи $\times$ площадь поверхности теплообмена ($K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}$)	945325
Температура теплоносителя на входе в АЗ	297
Удельная теплоемкость топливных элементов (γ_{T})	277
Удельная теплоемкость теплоносителя ($\gamma_{\text{ТН}}$)	4850

Исходная система (3) является нелинейной и «жесткой». Для ее представления в форме, пригодной для синтеза регулятора системы автоматического регулирования мощности, необходимо произвести линеаризацию в окрестности рабочей точки, принимая исходное состояние как

критическое, т.е. $\rho_0 = 0$, и от шести групп запаздывающих нейтронов перейдем к одной усредненной. Путем исключения переменных, описывающих установившийся режим, а также величин второго порядка малости получим линеаризованную систему (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\left(\frac{\delta P(t)}{P_0}\right)}{dt} = -\frac{\beta}{\Lambda}\left(\frac{\delta P(t)}{P_0}\right) + \lambda\delta\bar{C}(t) + \frac{\alpha_{\text{T}}^{\text{T}}}{\Lambda}\delta\bar{T}(t) + \frac{\alpha_{\text{ТН}}^{\text{T}}}{2\Lambda}\delta\bar{\Theta}_1(t) + \frac{\alpha_{\text{ТН}}^{\text{T}}}{2\Lambda}\delta\bar{\Theta}_2(t) + \frac{1}{\Lambda}\delta\rho_0(t), \\ \frac{d\delta\bar{C}(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda}\left(\frac{\delta P(t)}{P_0}\right) - \lambda\delta\bar{C}(t), \\ \frac{d\delta\bar{T}(t)}{dt} = \frac{\varepsilon P_0}{m_{\text{T}}\gamma_{\text{T}}}\left(\frac{\delta P(t)}{P_0}\right) + \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{m_{\text{T}}\gamma_{\text{T}}}\delta\bar{T}(t) - \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{m_{\text{T}}\gamma_{\text{T}}}\delta\bar{\Theta}_1(t), \\ \frac{d\delta\bar{\Theta}_1(t)}{dt} = \frac{(1-\varepsilon)P_0}{2m_{\text{ТН1}}\gamma_{\text{ТН}}}\left(\frac{\delta P(t)}{P_0}\right) + \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{2m_{\text{ТН1}}\gamma_{\text{ТН}}}\delta\bar{T}(t) - \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}} + 2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}}{2m_{\text{ТН1}}\gamma_{\text{ТН}}}\delta\bar{\Theta}_1(t) + \frac{G_{\text{ТН}}}{m_{\text{ТН1}}}\delta\bar{\Theta}_{\text{вх}}(t), \\ \frac{d\delta\bar{\Theta}_2(t)}{dt} = \frac{(1-\varepsilon)P_0}{2m_{\text{ТН2}}\gamma_{\text{ТН}}}\left(\frac{\delta P(t)}{P_0}\right) + \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{2m_{\text{ТН2}}\gamma_{\text{ТН}}}\delta\bar{T}(t) - \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}} + 2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}}{2m_{\text{ТН2}}\gamma_{\text{ТН}}}\delta\bar{\Theta}_1(t) + \frac{G_{\text{ТН}}}{m_{\text{ТН2}}}\delta\bar{\Theta}_2(t). \end{array} \right. \quad (4)$$

Система (4) представляет собой Multiple Input Multiple Output (MIMO) – систему, где входными возмущениями являются отклонение реактивности $\delta\rho_0(t)$ и отклонение температуры теплоносителя на входе в АЗ $\delta\bar{\theta}_{\text{вх}}(t)$, а выходными параметрами – относительное отклонение

мощности реактора $\frac{\delta P(t)}{P_0}$ и отклонение температуры теплоносителя на выходе из АЗ $\delta\bar{\theta}_2(t)$.

Следовательно, уравнение в пространстве состояний принимает вид (5):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } A = \begin{bmatrix} -\frac{\beta}{\Lambda} & \lambda & \frac{\alpha_T^T}{\Lambda} & \frac{\alpha_{\text{ТН}}^T}{2\Lambda} & \frac{\alpha_{\text{ТН}}^T}{2\Lambda} \\ \frac{\beta}{l} & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\varepsilon P_0}{m_T \gamma_T} & 0 & \frac{K_{\text{теплооб}} S_{\text{пов}}}{m_T \gamma_T} & -\frac{K_{\text{теплооб}} S_{\text{пов}}}{m_T \gamma_T} & 0 \\ \frac{(1-\varepsilon)P_0}{2m_{\text{ТН1}} \gamma_{\text{ТН}}} & 0 & \frac{K_{\text{теплооб}} S_{\text{пов}}}{2m_{\text{ТН1}} \gamma_{\text{ТН}}} & -\frac{K_{\text{теплооб}} S_{\text{пов}} + 2G_{\text{ТН}} \gamma_{\text{ТН}}}{2m_{\text{ТН1}} \gamma_{\text{ТН}}} & 0 \\ \frac{(1-\varepsilon)P_0}{2m_{\text{ТН2}} \gamma_{\text{ТН}}} & 0 & \frac{K_{\text{теплооб}} S_{\text{пов}}}{2m_{\text{ТН2}} \gamma_{\text{ТН}}} & \frac{K_{\text{теплооб}} S_{\text{пов}} + 2G_{\text{ТН}} \gamma_{\text{ТН}}}{2m_{\text{ТН2}} \gamma_{\text{ТН}}} & -\frac{G_{\text{ТН}}}{m_{\text{ТН2}}} \end{bmatrix} - \text{матрица системы;}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{G_{\text{ТН}}}{m_{\text{ТН}}} & 0 \end{bmatrix}^T - \text{матрица управления; } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матрица выхода;}$$

$$x(t) = \left[\frac{\delta P(t)}{P_0} \delta \bar{C}(t) \delta \bar{T}(t) \delta \bar{\theta}_1(t) \delta \bar{\theta}_2(t) \right]^T - \text{вектор состояния;}$$

$$u(t) = [\delta\rho_0 \ \delta\bar{\theta}_{\text{вх}}]^T - \text{вектор управления, } y(t) = \left[\frac{\delta P(t)}{P_0} \delta \bar{\theta}_2(t) \right]^T - \text{вектор выхода.}$$

Также из (5) может быть получена передаточная матрица системы (6):

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta P(s)}{P_0} \\ \delta \bar{\theta}_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\rho_0(s) \\ \delta\bar{\theta}_{\text{вх}}(s) \end{bmatrix} = W_{\text{реактора}}^i(s) \begin{bmatrix} \delta\rho_0(s) \\ \delta\bar{\theta}_{\text{вх}}(s) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $G_{11}(s)$ – передаточная функция по каналу «отклонение реактивности – относительное отклонение мощности» (7.1–7.3); $G_{12}(s)$ – передаточная функция по каналу «отклонение температуры ТН на входе в АЗ – отклонение мощности реактора»; $G_{21}(s)$ – передаточная функция по каналу «отклонение реактивности – отклонение температуры ТН на выходе из АЗ»; $G_{22}(s)$ – передаточная функция по каналу «от-

клонение температуры ТН на входе в АЗ – отклонение температуры ТН на выходе из АЗ».

Из (7) можно определить численные значения передаточной функции по каналу «отклонение реактивности – относительное отклонение мощности»; выражения (7.1–7.3) соответствуют уровням мощности 10, 50 и 100 % от номинальной, соответственно:

$$G_{10}(s) = \frac{55.87s^4 + 712.4s^3 + 2301s^2 + 187.5s + 0.2571}{s^5 + 370.3s^4 + 4583s^3 + 14500s^2 + 389s + 29.37}, \quad (7.1)$$

$$G_{50}(s) = \frac{55.87s^4 + 712.4s^3 + 2301s^2 + 187.5s + 0.2571}{s^5 + 370.3s^4 + 4631s^3 + 15070s^2 + 1865s + 146.9}, \quad (7.2)$$

$$G_{100}(s) = \frac{55.87s^4 + 712.4s^3 + 2301s^2 + 187.5s + 0.2571}{s^5 + 370.3s^4 + 4691s^3 + 15780s^2 + 3710s + 293.7}. \quad (7.3)$$

Анализируя выражения (7.1–7.3), можно сделать вывод о необходимости перенастройки ПИ-регулятора каждый раз при переходе на но-

вый уровень мощности для обеспечения требуемых показателей качества управления и запасов устойчивости.

Математическая модель ОР СУЗ в первом приближении может быть представлена линейным звеном с коэффициентом передачи K_{OP} [7, 9, 12], хотя известно, что интегральная характеристика стержней нелинейная, если их положение по высоте активной зоны отклоняется от среднего. Для уточнения математической модели были использованы данные, полученные с многофункционального тренажера ВВЭР – 1200 (АНО ДПО Техническая академия Росатома) для интегральной эффективности $\rho(H_{12})$ 12 группы ОР СУЗ при изменении ее положений (H_{12}) в пределах от 50 до 250 см. Экспериментальные измерения и их аппроксимации с использованием пакета *curveFitter* MATLAB приведены на рис. 2.

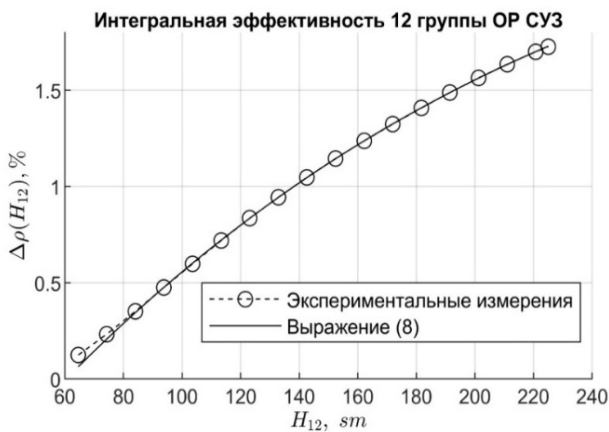


Рис. 2. Аппроксимация значений интегральной эффективности 12 группы ОР СУЗ

Для аппроксимации комбинацией экспоненциальных и линейной функций использовался алгоритм Левенберга — Марквардта для нелинейного метода наименьших квадратов, приводящий к результату вида (8):

$$y(z) = C_1 \exp(\lambda_1 z) + C_2 \exp(\lambda_2 z) + kz + d = -411e^{-0.002365z} + 409.9e^{-0.002365z} + 3.37 \times 10^{-5}z + 0.0264. \quad (8)$$

При использовании аппроксимирующей модели (8) коэффициент детерминации (R^2) составил 0.9994, среднеквадратичное отклонение составило 0.01509. Также (8) является общим решением неоднородного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами, из которого при нулевых начальных условиях может быть получена передаточная функция по каналу «положение ОР СУЗ – интегральная эффективность ОР СУЗ» вида (9):

$$G_{СУЗ}(s) = \frac{\rho(s)}{y(s)} = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{\frac{b_0}{a_0}}{\frac{a_2}{a_0} s^2 + \frac{a_1}{a_0} s + 1} = \frac{3.37 \times 10^{-5}}{2 \times 10^4 s^2 + 853.5s + 1}. \quad (9)$$

Для передаточной функции ШЭМ, передаточных функций ядерного реактора на разных уровнях мощности, передаточной функции 12 группы ОР СУЗ с обратной связью, заданной передаточной функцией датчиков потока нейтронов с использованием *pidtuneOptions* MATLAB, было синтезировано 10 ПИ-регуляторов для каждого уровня мощности РУ, обеспечивающих запас устойчивости по фазе для разомкнутой системы 60° . Значения полученных запасов устойчивости по фазе и амплитуде разомкнутых САР приведены в табл. 2.

Таблица 2. Запасы устойчивости по фазе и амплитуде смоделированных САР

Текущий уровень мощности РУ в % от номинальной	Запас устойчивости по фазе $\psi, ^\circ$	Запас устойчивости по амплитуде ΔL , Дб
10	60	14.8
20	60	23
30	60	28.9
40	60	33.1
50	60	35.9
60	60	37.7
70	60	39
80	60	40
90	60	40.8
100	60	41.4

Параметры K_P и K_I ПИ – регулятора оказались возможным аппроксимировать линейной зависимостью методом наименьших квадратов, используя процедуру *polyfit*. Полученные функциональные зависимости представлены выражениями (10.1) и (10.2):

$$K_P(P_0) = 6.4437 \times P_0(\%) - 1.2933, \quad (10.1)$$

$$K_I(P_0) = 0.0681 \times P_0(\%) - 0.0257, \quad (10.2)$$

что позволяет использовать простой алгоритм перенастройки параметров каждый раз при переходе на новый уровень мощности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА И НЕЧЕТКОГО ПИ-РЕГУЛЯТОРА

Под нечетким управлением понимается такая стратегия управления, которая основана на опыте наблюдателя о функционировании объекта, и

в которой отношения между входом и выходом процесса регулирования представляются в лингвистической форме в виде некоторой совокупности нечетких правил. При этом, в отличие от проектирования САР с использованием традиционных ПИ- и ПИД-регуляторов, при проектировании системы управления на основе нечеткой логики для улучшения качества управления на вход регулятора подается как сигнал ошибки $\varepsilon(t)$, так и скорость изменения сигнала ошибки $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ [12, 15, 20]. Соответственно, выходным параметром классического нечеткого регулятора будет управляющий сигнал $u(t)$, в то время как для нечеткого ПИ-регулятора выходными параметрами будут K_P и K_I составляющие регулятора, которые затем подаются на сумматор и формируют управляющий сигнал $u(t)$. Структурные схемы нечеткого и нечеткого ПИ-регуляторов представлены на рис. 3 и 4, соответственно.



Рис. 3. Структурная схема нечеткого регулятора

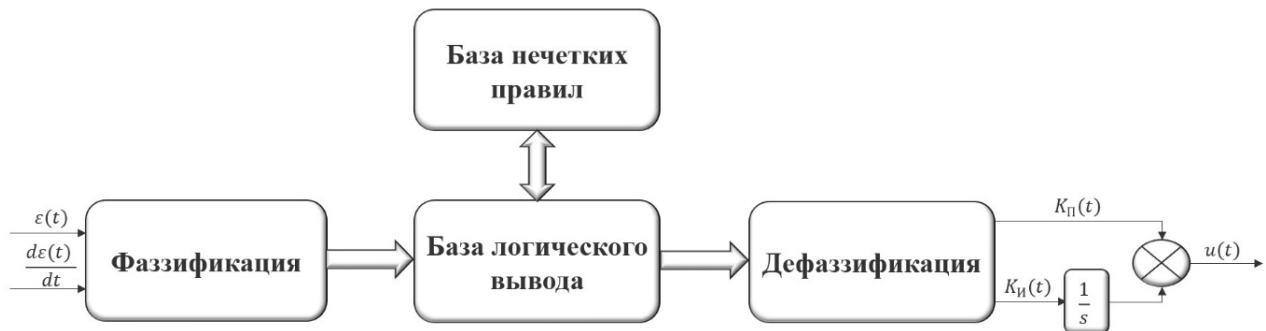


Рис. 4. Структурная схема нечеткого ПИ-регулятора

Для лингвистической переменной $\varepsilon(t)$ в нечетких регуляторах было определено следующее терм-множество: $T(\varepsilon(t)) = \{\text{NB} - \text{“Negative Big”}, \text{NM} - \text{“Negative Medium”}, \text{NS} - \text{“Negative Small”}, \text{Z} - \text{“Zero”}, \text{PS} - \text{“Positive Small”}, \text{PM} - \text{“Positive Medium”}, \text{PB} - \text{“Positive Big”}\}$. Диапазон изменения сигнала ошибки варьируется в пределах $[-1.1; 1.1]$.

Для лингвистической переменной $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ было определено следующее терм-множество: $T\left(\frac{d\varepsilon(t)}{dt}\right) = \{\text{NB} - \text{“Negative Big”}, \text{NS} - \text{“Negative Small”}, \text{Z} - \text{“Zero”}, \text{PS} - \text{“Positive Small”}, \text{PB} - \text{“Positive Big”}\}$, диапазон изменений составил также $[-1.1; 1.1]$.

Для управляющего сигнала $u(t)$ было определено следующее терм-множество: $T(u(t)) = \{NB - \text{“Negative Big”}, NM - \text{“Negative Medium”}, NS - \text{“Negative Small”}, Z - \text{“Zero”}, PS - \text{“Positive Small”}, PM - \text{“Positive Medium”}, PB - \text{“Positive Big”}\}$, диапазон изменений составил $[-6000; 6000]$.

Для лингвистических переменных K_P и K_I было определены следующие терм-множества: $T(K_P) = \{VL - \text{“Very Low”}, ML - \text{“Medium Low”}, S - \text{“Small”}, Z - \text{“Zero”}, H - \text{“High”}, MH - \text{“Medium High”}, VH - \text{“Very High”}\}$ и $T(K_I) = \{VL - \text{“Very Low”}, L - \text{“Low”}, Z - \text{“Zero”}, H - \text{“High”}, VH - \text{“Very High”}\}$ с диапазонами изменений $[-643; 643]$ и $[-6.78; 6.78]$ соответственно. Все функции принадлежности имеют треугольную форму, и приведены на рис. 5–9, соответственно.

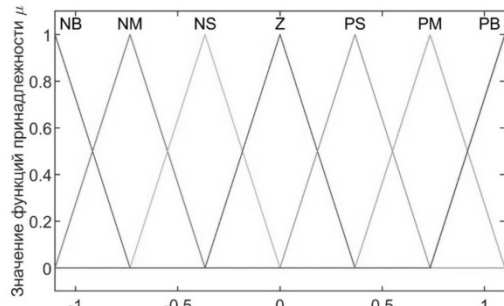


Рис. 5. Функции принадлежности сигнала ошибки ε

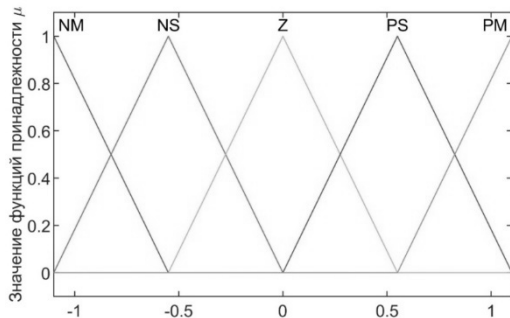


Рис. 6. Функции принадлежности скорости изменения сигнала ошибки $\frac{d\varepsilon}{dt}$

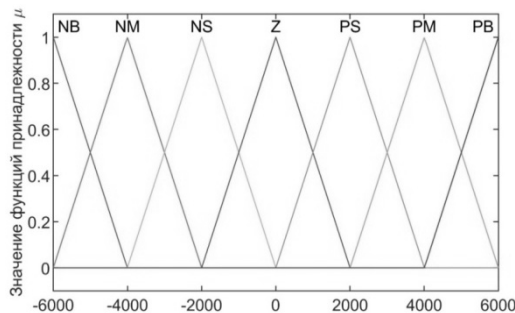


Рис. 7. Функции принадлежности управляющего сигнала u и нечеткого регулятора

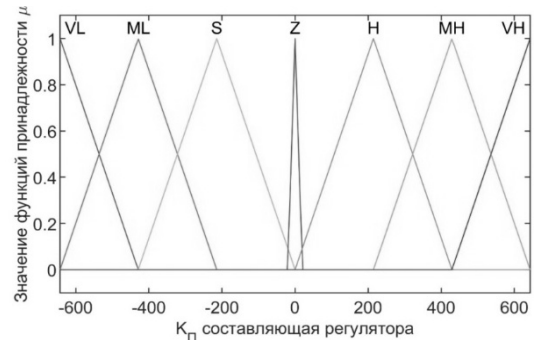


Рис. 8. Функции принадлежности K_P составляющей нечеткого ПИ-регулятора

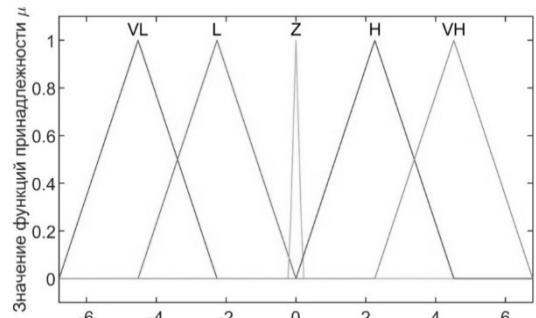


Рис. 9. Функции принадлежности K_I составляющей нечеткого ПИ-регулятора

База активных правил для нечетких регуляторов составила $7 \times 5 = 35$ правил. Правила нечеткого вывода представлены в табл. 3 и 4, соответственно.

В качестве алгоритма нечеткого вывода был выбран алгоритм Мамдани (макс.-мин.). Дефазификация проводится методом центра тяжести, который возвращает центр тяжести нечеткого множества для выходного сигнала, как представлено в формуле (11):

$$X_{\text{ц.т.}} = \frac{\sum_i \mu_i(x_i)x_i}{\sum_i \mu_i(x_i)}. \quad (11)$$

Переходный процесс при скачкообразном изменении уставки со стороны оператора на уровень мощности, составляющий 10 % от первоначального при использовании ПИ-нечеткого, и нечеткого ПИ-регуляторов на номинальной мощности, показан на рис. 10.

По рис. 10 можно определить показатели качества процесса управления, а именно, величину перерегулирования и время регулирования, которые составили $\sigma_{\text{Fuzzy}} \approx 0.91\%$, $t_{\text{регFuzzy}} \approx 100$ с для нечеткого, $\sigma_{F-P} \approx 0.8\%$, $t_{\text{регF-P}} \approx 100$ с для нечеткого ПИ-регулятора, и $\sigma_{PI} \approx 1.36\%$, $t_{\text{рег}} \approx 1100$ с. Большое время регулирования может накладывать ограничения на работу ПИ-регулятора в режиме следования за нагрузкой.

Таблица 3. Правила нечеткого вывода для нечеткого регулятора

Управляющий сигнал u		Скорость изменения сигнала ошибки $\frac{d\varepsilon}{dt}$				
		NM	NS	Z	PS	PM
Сигнал ошибки ε	NB	NB	NB	NM	NM	NS
	NM	NB	NM	NM	NS	Z
	NS	NM	NS	NS	Z	Z
	Z	NS	NS	Z	PS	PS
	PS	Z	Z	PS	PS	PM
	PM	Z	PS	PM	PM	PB
	PB	PS	PM	PM	PB	PB

Таблица 4. Правила нечеткого вывода для нечеткого ПИ-регулятора

Составляющие регулятора K_P, K_I		Скорость изменения сигнала ошибки $\frac{d\varepsilon}{dt}$				
		NM	NS	Z	PS	PM
Сигнал ошибки ε	NB	VL&VL	VL&L	ML&L	ML&L	S&Z
	NM	VL&L	ML&L	ML&Z	S&Z	Z&Z
	NS	ML&Z	S&Z	S&Z	Z&Z	Z&Z
	Z	S&Z	S&Z	Z&Z	H&Z	H&Z
	PS	Z&Z	Z&Z	H&Z	H&Z	MH&H
	PM	Z&Z	H&Z	MH&H	MH&H	VH&H
	PB	H&Z	MH&Z	MH&H	VH&H	VH&H

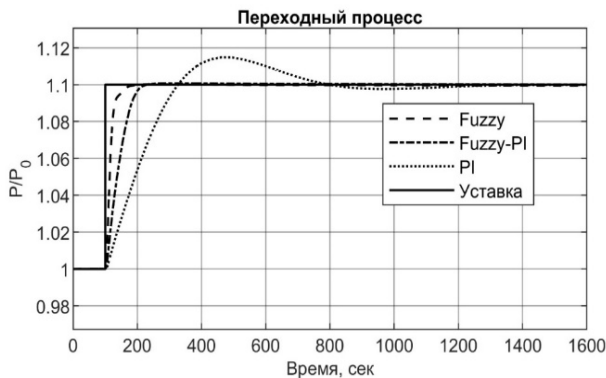


Рис. 10. Переходный процесс при скачкообразном изменении уставки +10 %

Для более полной оценки разработанных регуляторов необходимо рассмотреть изменение мощности, приближенное к наблюдаемому на реальных ядерных установках, а именно режим следования за нагрузкой [21]. Пусть со стороны оператора происходит плавное изменение уставки в течение 100 с путем перемещения 12 группы ОР СУЗ, и реактор переходит на мощность $1.1P_0$, а затем с уровня мощности P_0 в течение 100 с происходит переход на значение

мощности $0.9P_0$. Такие пределы были установлены эмпирическим путем из-за линеаризации модели динамики реактора, так как в режиме глубокого маневрирования, например $100\%P_0 - 50\%P_0$, необходимо переключаться между выражениями 7.3 и 7.2.

Соответствующие переходные процессы представлены на рис. 11 и 12, соответственно.

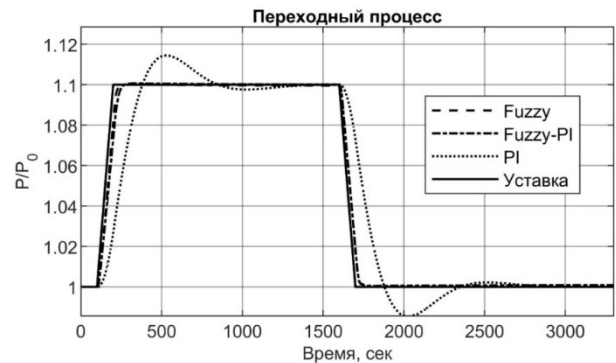


Рис. 11. Переходный процесс $P_0 \rightarrow 1.1P_0 \rightarrow P_0$

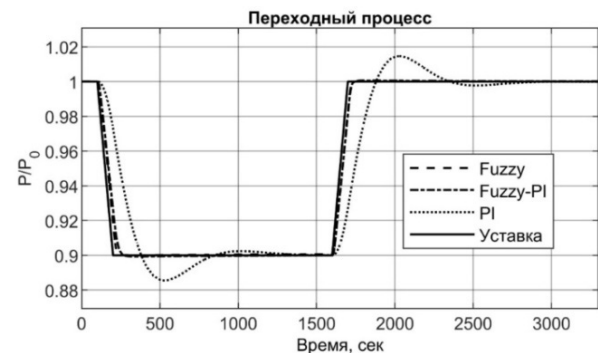


Рис. 12. Переходный процесс $P_0 \rightarrow 0.9P_0 \rightarrow P_0$

Режим набора мощности, состоящий из нескольких ступеней (при этом переход на новый уровень может происходить только после достижения установившегося значения) вида $P_0 \rightarrow 1.025P_0 \rightarrow 1.05P_0 \rightarrow 1.75P_0 \rightarrow 1.1P_0$, представлен на рис. 13.

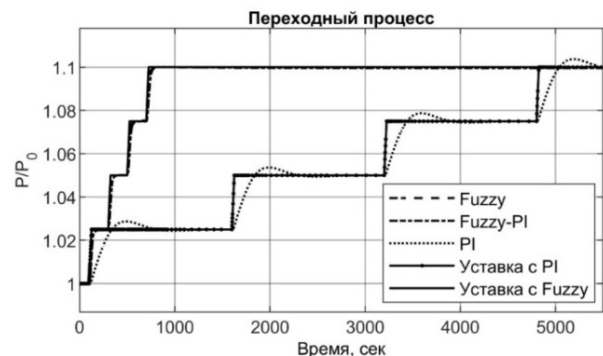


Рис. 13. Переходный процесс $P_0 \rightarrow 1.025P_0 \rightarrow 1.05P_0 \rightarrow 1.75P_0 \rightarrow 1.1P_0$

Такой маневр при использовании регуляторов на нечеткой логике совершается за время $t_1 \approx 1000$ с, в то время как при использовании классического ПИ-регулятора понадобилось время $t_2 \approx 5500$ с.

В режиме «Н» автоматический регулятор мощности ВВЭР-1200 должен осуществлять астатическое поддержание нейтронной мощности в диапазоне от $3\%P_{\text{ном}}$ до $100\%P_{\text{ном}}$ с зоной нечувствительности к шумам не более $\pm 1\%P_{\text{ном}}$. Для имитации возникающих шумов от датчиков потока нейтронов в контур спроектированных САР был внесен генератор случайных сигналов, заданный блоком *Band-Limited White Noise*, который является квантователем непрерывного сигнала, представляющего белый шум и генерирующего нормально распределенные случайные числа, причем дисперсия сигнала шума при проведении моделирования равна $D(x) \approx 15000$, а математическое ожидание $M(x) \approx 0$. Полученные результаты представлены на рис. 14

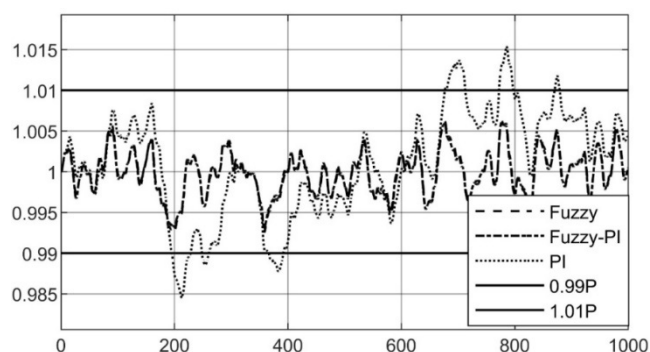


Рис. 14. Реакция САР мощности на возникающие шумы

Поведение среднеквадратичного отклонения ($\sqrt{D(x)}$) сигнала белого шума, а также среднего значения сигнала, полученного с использованием библиотеки *Statistics*, представлено на рис. 15.

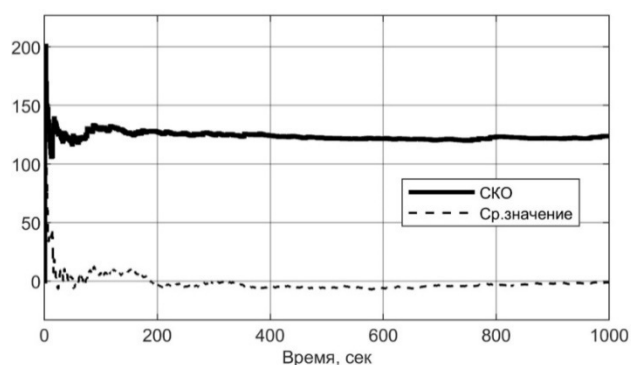


Рис. 15. Поведение среднеквадратичного отклонения (СКО) и среднего значения сигнала белого шума

Опираясь на данные рис. 14 можно сделать вывод, что смоделированные средствами MATLAB нечеткий и нечеткий ПИ-регуляторы успешно подавляют возникающий шум и не выходят за максимально установленные пределы, составляющие $\pm 1\%P_{\text{ном}}$ из-за использованных правил нечеткого вывода, в то время как для классического ПИ-регулятора может потребоваться перемещение ОР СУЗ для подавления возникающих шумов, что потенциально приводит к ускоренному износу исполнительного механизма.

ВЫВОДЫ

В данной работе были смоделированы нечеткий и нечеткий ПИ-регуляторы для контура системы автоматического регулирования мощности ядерной энергетической установки ВВЭР-1200. Во всех приведенных тестах: при скачкообразном изменении уставки оператора, при следовании за нагрузкой, а также при включении в контур САР шумов спроектированные регуляторы на нечеткой логике продемонстрировали лучшую производительность в сравнении с традиционным ПИ-регулятором. Также к их безусловному достоинству следует отнести возможность работать без необходимости перенастройки в диапазоне изменения мощности $10\%P_{\text{ном}} - 100\%P_{\text{ном}}$ без заметного ухудшения прямых показателей качества процесса управления.

Внедрение регуляторов на нечеткой логике в системах управления мощности реакторных установок может привести к улучшению их маневренных характеристик, снижению эксплуатационных рисков и повышению общей производительности АЭС. Способность таких регуляторов с нечеткой логикой управлять сложными и нелинейными системами, такими как ядерные реакторы, делает их многообещающей альтернативой традиционным методам управления и, в частности, «пропорционально-интегральному» закону управления, применяемому в настоящее время для маневренных режимов реакторов ВВЭР.

Однако, при всех неоспоримых преимуществах, важно отметить, что внедрение регуляторов на нечеткой логике на атомных электростанциях требует тщательного рассмотрения таких факторов, как системная интеграция, стандарты безопасности и соответствие нормативным требованиям. Поэтому необходимы дальнейшие исследования и испытания для проверки эффек-

тивности регуляторов на нечеткой логике в реальных условиях, например, на полномасштабных тренажерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Belleni-Morante A.* The kinetic behaviour of a reactor composed of G loosely coupled cores: Integral formulation // *Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology*, 1964. V. 18, Iss. 10. Pp. 547–559.
[https://doi.org/10.1016/0368-3230\(64\)90139-9](https://doi.org/10.1016/0368-3230(64)90139-9)
2. *Пикина Г.А., Ле Ван Динь, Пащенко Ф.Ф.* Модели динамики реактора ВВЭР с мощностным коэффициентом реактивности // *Вестник МЭИ*, 2016. № 2. С. 75–83.
3. *Никулина Е.Н.* Математическое моделирование систем автоматического регулирования тепловой мощности реактора // *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*: Сб. науч. тр. Темат. вып.: Системный анализ, управление и информационные технологии. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. № 4. С. 131–136.
4. *Anith Khairunnisa Ghazali, et al.* PID Controller for nuclear reactor power control system // *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2018. V. 118. № 24.
5. *Jiang Y., Geslot B., Lamirand V., Leconte P.* Review of kinetic modulation experiments in low power nuclear reactors EPJ N // *Nuclear Sciences & Technologies*, 2020. V. 6. P. 55.
<https://doi.org/10.1051/epjn/2020017>.
6. *Zarei M.* A physically based PID controller for the power maneuvering of nuclear reactors // *Progress in Nuclear Energy*, 2020. V. 127. 103431.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103431>.
7. *Абдулрахим К.К., Толоконский А.О., Лаидани З., Беррекси Р.* Оптимальное управление на основе линейно-квадратичного регулятора для управления ядерным реактором // *Вестник НИЯУ МИФИ*, 2021. Т. 10. № 5. С. 436–447.
<https://doi.org/10.1134/S2304487X21050023>.
8. *Arab-Alibeik H., Setayeshi S.* Improved Temperature Control of a PWR Nuclear Reactor Using an LQG/LTR Based Controller // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003. V. 50. Pp. 211–218.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2002.807860>.
9. *Yan X., et al.* Robust power control design for a small, pressurized water reactor using an H infinity mixed sensitivity method // *Nuclear Engineering and Technology*, 2020. V. 52. Iss. 7. Pp. 1443–1451.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2019.12.031>.
10. *Vajpayee V., Mukhopadhyay S., Tiwari A.P.* Data-Driven Subspace Predictive Control of a Nuclear Reactor // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2018. V. 65, № 2. Pp. 666–679. DOI: 10.1109/TNS.2017.2785362.
11. *Calvillo C.F. et al.* Comparison of Model Based Predictive Control and Fuzzy Logic Control of a DFIG with an Indirect Matrix Converter // *IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, QC, Canada, 2012. P. 6063–6068. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389090.
12. *Zeng W., et al.* A functional variable universe fuzzy PID controller for load following operation of PWR with the multiple model // *Annals of Nuclear Energy*, 2020. V. 140.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107174>.
13. *Liu X., Wang M.* Nonlinear Fuzzy Model Predictive Control for a PWR Nuclear Power Plant // *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. V. 2014. Article ID 908526, 10 p. <https://doi.org/10.1155/2014/908526>.
14. *Zeng W. et al.* Core power control of a space nuclear reactor based on a nonlinear model and fuzzy-PID controller // *Progress in Nuclear Energy*, 2021. V. 132.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103564>.
15. *Zeng W. et al.* A fuzzy-PID composite controller for core power control of liquid molten salt reactor // *Annals of Nuclear Energy*, 2020. V. 139.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107234>.
16. *Acharya D., Rai A., Kumar Das D.* Optimal rule based fuzzy-PI controller for core power control of nuclear reactor // *Annals of Nuclear Energy*, 2023. V. 194.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110118>.
17. *Zhang L., Xie H., Duan Q., Lu C., Li J., et al.* Power Level Control of Nuclear Power Plant Based on Asymptotical State Observer under Neutron Sensor Fault // *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2021. V. 2021, Article ID 8833729, 8 p.
<https://doi.org/10.1155/2021/8833729>.
18. *Щукин К.Ю.* Математическое моделирование процессов, протекающих при перемещении шагового привода // *Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ-2007*. Т. 104. С. 70–76.
19. *Правосуд С.С., Маслаков Д.С., Якубов Я.О., Овчеренко А.А.* Верификация модели динамики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящей из одного топливного узла, примыкающего к двум узлам теплоносителя // *Глобальная Ядерная Безопасность*, 2023. Т. 48(3). С. 82–95.
<https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>.
20. *Беррекси Р., Толоконский А.О., Лаидани З., Абдулрахим К.К., Кудратов В.Н.* Применение нечеткой логики в системах реального времени на базе программно-технического комплекса УМИ-КОН // *Вестник НИЯУ МИФИ*, 2022. Т. 11. № 1. С. 68–79.
<https://doi.org/10.56304/S2304487X2201059>.
21. *Джарум Б., Соловьёв Д.А., Семенов А.А., Щукин Н.В., Выговский С.Б., Аль-Шамайлах А.И., Танаи Х.А.* Влияние температурного регулирования при работе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой // *Вестник НИЯУ МИФИ*, 2020. Т. 9. № 3. С. 201–209.
<https://doi.org/10.56304/S2304487X20030037>.

AN APPLICATION OF FUZZY LOGIC CONTROLLERS FOR POWER CONTROL OF THE VVER-1200 NUCLEAR REACTOR

S. Pravosud^{1,2*}, D. Maslakov², Ya. Yakubov²

¹Rosatom Technical Academy, Obninsk, 249031, Russia

²Seversk Technological Institute – a branch of the National Research Nuclear University MEPhI
Seversk, 636036, Russia

*e-mail: ssepravosud@rosatom.ru

*e-mail: sspravosud@mephi.ru

Received December 11, 2023; revised February 18, 2024; accepted March 5, 2024

This article deals with fuzzy and fuzzy-PI controllers for the automatic power control system of a non-linear mathematical model of the VVER-1200 nuclear reactor. The power control systems loop includes a mathematical model of the electromagnetic stepper motor, a model of in-core and ex-core neutron flux sensors, and a refined mathematical model of the group 12 of control and protection system control rods, obtained by approximating experimental data using the Levenberg–Marquardt algorithm for nonlinear least-square problem. Based on the state-space model, 10 transfer function matrices of the nuclear reactor corresponding to the power range of 10 to 100 % of the nominal power were also determined, and 10 classical PI controllers were modelled to ensure stability margins of at least 60 degrees in phase and at least 10 decibels in amplitude for each power level of the plant. Simulation results show significant advantages of the developed fuzzy controllers both in the steady-state power maintenance mode considering noise in the neutron flux sensor channel, and in load-following mode at different power levels.

Keywords: automatic power regulation, fuzzy logic, fuzzy logic controller, fuzzy-PI controller, VVER-1200, transfer function, state space, robustness.

REFERENCES

1. *Belleni-Morante A.* The kinetic behaviour of a reactor composed of G loosely coupled cores: Integral formulation. *Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology*, 1964. Vol. 18. Iss. 10. Pp. 547–559.
[https://doi.org/10.1016/0368-3230\(64\)90139-9](https://doi.org/10.1016/0368-3230(64)90139-9).
2. *Pikina G.A., Le Van Din, Pashchenko F.F.* Modeli dinamiki reaktora VVER s moshchnostnym koeffitsiyentom reaktivnosti [Mathematical models of VVER reactor with power reactivity coefficients]. *Vestnik MEI*, 2016. No. 2. Pp. 75–83 (in Russian).
3. *Nikulina E.N.* Matematicheskoye modelirovaniye sistem avtomaticheskogo regulirovaniya teplovoy moshchnosti reaktora [Mathematical modelling of control systems of the heat power of a nuclear reactor]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta «KhPI»*: Sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz. upravleniye i informatsionnyye tekhnologii. Kharkov: NTU «KhPI», 2009. No. 4. Pp. 131–136 (in Russian).
4. *Anith Khairunnisa Ghazali et al.* PID Controller for nuclear reactor power control system, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2018. Vol. 118. No. 24.
5. *Jiang Y., Geslot B., Lamirand V., Leconte P.* Review of kinetic modulation experiments in low power nuclear reactors *EPJ N. Nuclear Sciences & Technologies*, 2020. Vol. 6. P. 55.
<https://doi.org/10.1051/epjn/2020017>.
6. *Zarei M.* A physically based PID controller for the power maneuvering of nuclear reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 2020. Vol. 127. 103431.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103431>.
7. *Abdulrahim K.K., Tolokonskiy A.O., Laidani Z., Berreksi R.* Optimal'noe upravleniye na osnove linejno-kvadratichnogo regulatora dlya upravleniya yadernym reaktorom [Optimal Control Based on a Linear-Quadratic Regulator for Controlling a Nuclear Reactor]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2021. Vol. 10. No. 5. Pp. 436–447 (in Russian).
<https://doi.org/10.1134/S2304487X21050023>.
8. *Arab-Alibeik H., Setayeshi S.* Improved Temperature Control of a PWR Nuclear Reactor Using an LQG/LTR Based Controller. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003. Vol. 50. Pp. 211–218.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2002.807860>.
9. *Yan X., et al.* Robust power control design for a small, pressurized water reactor using an H infinity mixed sensitivity method. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020. Vol. 52. Iss. 7. Pp. 1443–1451.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2019.12.031>.
10. *Vajpayee V., Mukhopadhyay S., Tiwari A.P.* Data-Driven Subspace Predictive Control of a Nuclear Re-

actor. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018. Vol. 65. No. 2. Pp. 666–679. DOI: 10.1109/TNS.2017.2785362.

11. *Calvillo C.F. et al.* Comparison of Model Based Predictive Control and Fuzzy Logic Control of a DFIG with an Indirect Matrix Converter. IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada, 2012. Pp. 6063–6068. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389090.

12. *Zeng W. et al.* A functional variable universe fuzzy PID controller for load following operation of PWR with the multiple model. Annals of Nuclear Energy, 2020. Vol. 140.

<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107174>.

13. *Liu X, Wang M.* Nonlinear Fuzzy Model Predictive Control for a PWR Nuclear Power Plant. Mathematical Problems in Engineering, 2014. Vol. 2014. Article ID 908526. 10 p.

<https://doi.org/10.1155/2014/908526>.

14. *Zeng W., et al.* Core power control of a space nuclear reactor based on a nonlinear model and fuzzy-PID controller. Progress in Nuclear Energy, 2021. Vol. 132.

<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103564>.

15. *Zeng W., et al.* A fuzzy-PID composite controller for core power control of liquid molten salt reactor. Annals of Nuclear Energy, 2020. Vol. 139.

<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107234>.

16. *Acharya D., Rai A., Kumar Das D.* Optimal rule based fuzzy-PI controller for core power control of nuclear reactor. Annals of Nuclear Energy, 2023. Vol. 194.

<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110118>.

17. *Zhang L., Xie H., Duan Q., Lu C., Li J., et al.* Power Level Control of Nuclear Power Plant Based on Asymptotical State Observer under Neutron Sensor Fault // Science and Technology of Nuclear Installations, 2021. Vol. 2021, Article ID 8833729, 8 p.

<https://doi.org/10.1155/2021/8833729>.

18. *Shchukin K.Yu.* Matematicheskoye modelirovaniye protsessov. protekayushchikh pri peremeshchenii shagovogo privoda [Mathematical modelling of the processes occurring when electromagnetic stepper motor is moved]. Voprosy elektromekhaniki. Trudy NPP VNIIEM-2007. No. 104. Pp. 70–77 (in Russian).

19. *Pravosud S.S., Maslakov D.S., Yakubov Y.O., Ovcherenko A.A.* Verifikaciya modeli dinamiki yadernogo reaktora VVER-1200, sostoyashchej iz odnogo toplivnogo uzla, primykayushchego k dvum uzlam teplonositelya [Verification of the WWER-1200 reactor dynamic model consisting of one-fuel unit adjacent to two coolant units]. Global Nuclear Safety, 2023. Vol. 48(3). Pp. 82–95 (in Russian).

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>.

20. *Berreksi R., Tolokonskiy A.O., Laidani Z., Abdulrahim K.K., Kudratov V.N.* Primenenie nechetkoj logiki v sistemah real'nogo vremeni na baze programmno-tehnicheskogo kompleksa UMIKON [Application of Fuzzy Logic in Real-Time Systems Based on the Umicon Software and Hardware Complex]. Vestnik NIYaU MIFI, 2022. Vol. 11. No.1. Pp. 68–79 (in Russian).

<https://doi.org/10.56304/S2304487X22010059>.

21. *Djaroum B., Solovyev D.A., Semenov A.A., Schukin N.V., Vygovsky S.B., Al-Shamayleh A.I., Tanash H.A.* Vliyanie temperaturnogo regulirovaniya pri rabote VVER-1000 i VVER-1200 v rezhime sledovaniya za nagruzkoy [Temperature Regulation Contribution during the Power Control of the VVER-1000 and VVER-1200 Reactors in a Load-Following Mode]. Vestnik NIYaU MIFI, 2020. Vol. 9. No. 3. Pp. 201–209 (in Russian). <https://doi.org/10.56304/S2304487X20030037>.