

Имитационная модель цифровой системы автоматического регулирования давления в компенсаторе давления реакторной установки

Т.Г. Зацаринная, К.П. Аникевич

Севастопольский государственный университет

Аннотация: Имитационная модель цифровой системы автоматического регулирования (САР) давления в компенсаторе давления, применяемого для поддержания давления в первом контуре АЭС, представлена в данной статье. В результате моделирования получены графики переходных процессов и проведена оценка качества работы цифровой САР. Представленная имитационная модель реализована классическим способом, но с практической стороны классические регуляторы не всегда обеспечивают желаемый результат. В связи с чем, для улучшения качественных характеристик процесса регулирования предложена модель адаптивной САР с нейрорегулятором.

Ключевые слова: атомная станция, реактор, компенсатор, давление, температура, возмущение, регулятор, клапан, задвижка, турбина, модель, схема, нейронная сеть, оптимизация.

Введение. Ядерная энергетика, как и любая другая прогрессирующая технология, продолжает совершенствоваться. Накопленный опыт используется для разработки перспективных конструкций атомных электростанций. Энергоблоки нового поколения АЭС – 2006 с водяным энергетическим реактором (ВВЭР) номинальной электрической мощностью 1200 МВт, усовершенствованные и более экономичные, уже работают в России и продолжают сооружаться также и за ее пределами.

Целями разработки АЭС–2006 являлись повышенная безопасность, экономическая конкурентоспособность, потребительская привлекательность по надежности маневренности, ремонтпригодности [1]. Этот блок с реактором ВВЭР–1200 существенно отличается от проектов с ВВЭР–1000 по своим техническим характеристикам: максимальная тепловая мощность реактора до 3200 МВт; паропроизводительность парогенератора до 1600 т/ч; номинальная электрическая мощность генератора до 1200 МВт.

Два циркуляционных контура обеспечивают работоспособность реакторной установки с ВВЭР. В качестве теплоносителя в первом контуре (радиоактивном) применяется вода, температура которой 320°C ($329,7^{\circ}\text{C}$ для ВВЭР–1200). Для предотвращения ее закипания в контуре поддерживается высокое давление (16 МПа для ВВЭР–1000 и 16,2 МПа для ВВЭР–1200). При повышении температуры воды существует вероятность повышения давления замкнутого контура до недопустимых пределов из-за увеличения объема воды. Для исключения подобной ситуации в первом контуре установлен компенсатор давления (КД) или другое название этого устройства – компенсатор объема (КО), который представлен на рис. 1 в составе оборудования первого контура. Функциональная задача КД состоит в том, чтобы обеспечивать заданное давление первого контура в различных режимах работы реакторной установки.

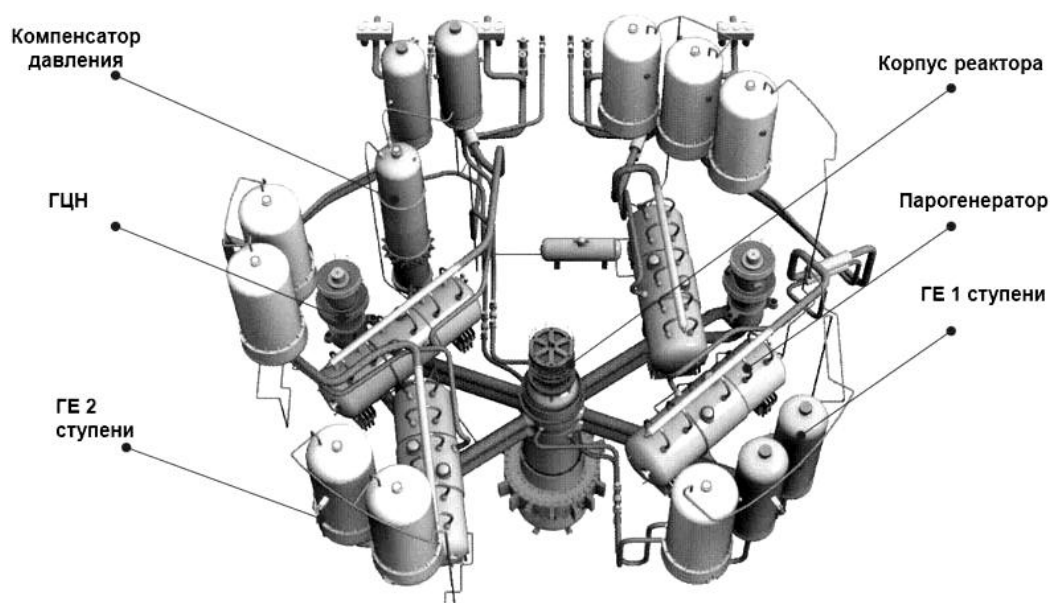


Рис. 1. – Компановка первого контура реакторной установки [1]: ГЦН – главный циркуляционный насосный агрегат; ГЕ1, ГЕ2 – система гидроемкостей первой и второй ступеней

Как отмечают авторы в работе [2], в переходных режимах работы возникают температурные изменения теплоносителя первого контура из-за нарушения в работе оборудования, а также при изменении нагрузки, при этом часть теплоносителя выводится из компенсатора в контур или попадает из контура в компенсатор по соединительному трубопроводу. Возникшие изменения давления в КД компенсируются за счет сжатия или расширения его паровой подушки. Процесс сжатия происходит путем конденсации паровой фазы в объеме КД из-за впрыска теплоносителя через сопла, расположенные в верхней части КД, куда теплоноситель подается с напора главного циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА) или из системы продувки-подпитки в случае неработающих ГЦНА. Обратный процесс – расширение, возникает из-за испарения водяной фазы в объеме КД, которое достигается поочередным включением групп трубчатых электронагревателей (ТЭН).

При избыточном давлении в системе компенсации давления предусмотрено импульсное предохранительное устройство (ИПУ), сбрасывающее пар с расходом до 150 кг/с в бак барботер [3].

Для обеспечения требуемых режимов работы КД предусмотрены штатные регуляторы (их пять, согласно источника [4]). Управление работой ТЭН и арматурой впрыска производится регуляторами давления и впрыска, в качестве входного сигнала в которые принято давление над активной зоной.

Поддержание давления в КД в установленных пределах, теоретически возможно, реализовать подпиткой или продувкой первого контура. Однако, как отмечено в работе [5], регулирование давления в первом контуре подобным способом является экономически не эффективным, поскольку при изменении средней температуры теплоносителя на 1 °С компенсирующее изменение объема имеет величину порядка 80 литров.

В связи с чем, использование имитационного моделирования для анализа динамических процессов в КД является актуальной темой, что также следует из анализа различных публикаций, представленных по теме управления технологическими параметрами системы компенсации давления АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Структура системы автоматического регулирования давления в компенсаторе давления

Структурная схема (рис. 2) выполнена по аналогии со схемой, предложенной в работе [3]. Автоматическое регулирование давления в КД осуществляется по двум каналам: «впрыск воды – давление в контуре» и «мощность нагревателей – давление в контуре», но в схеме (рис.2) учтена специфика технологического оборудования системы компенсации давления для АЭС-2006.

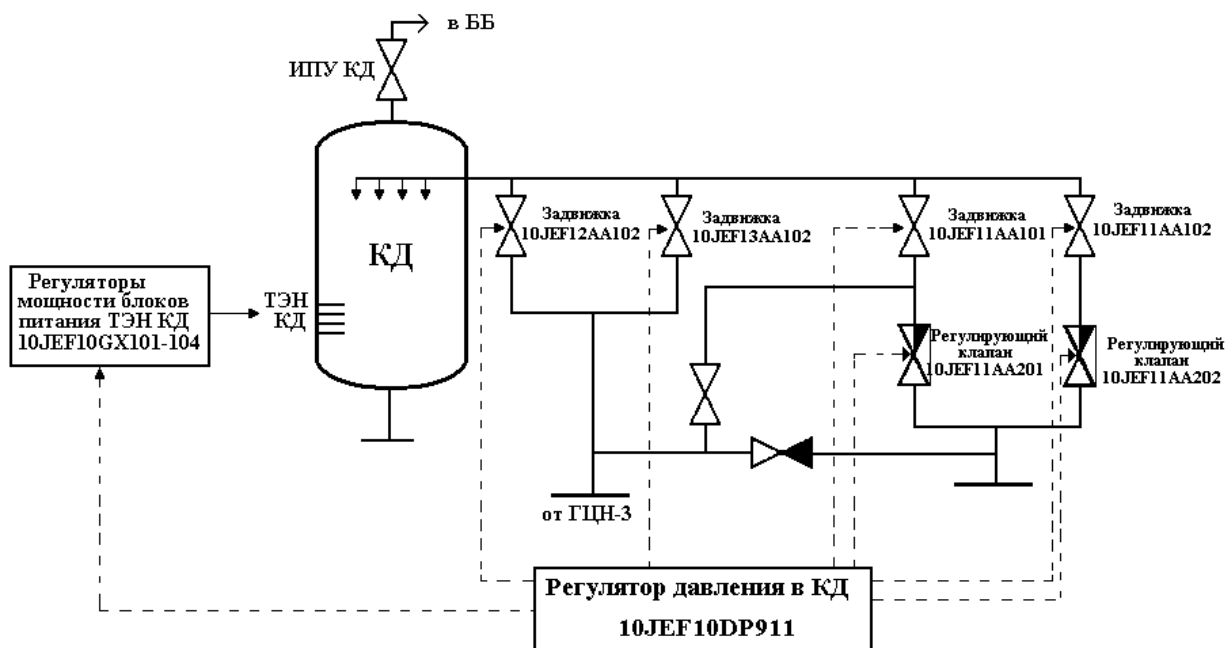


Рис. 2. – Структурная схема системы автоматического регулирования давления в компенсаторе давления (КД)

Регулируемым параметром является – давление на выходе из реактора, заданное значение составляет 16,1 МПа. Регулятор давления реализует следующий алгоритм:

– при увеличении давления от регулятора 10JEF10DP911 поступает команда на открытие регулирующего клапана «тонкого» впрыска 10JEF11AA201, 10JEF11AA202;

– при дальнейшем увеличении давления открывается задвижка на линии «тонкого» впрыска в КД 10JEF12AA102. Задвижка открывается при давлении $\geq 16,8$ МПа и закрывается при давлении $\leq 16,7$ МПа;

– при дальнейшем увеличении давления открывается задвижка на линии «грубого» впрыска в КД 10JEF12AA101. Задвижка открывается при давлении $\geq 17,0$ МПа и закрывается при давлении $\leq 16,9$ МПа;

– при снижении давления от регулятора 10JEF10DP911 поступает команда на регуляторы мощности блоков питания ТЭН КД и включаются ТЭН КД. Управление арматурой на включение и отключение групп ТЭН осуществляется в соответствии с таблицей № 1.

Таблица № 1.

Алгоритм регулирования давления в компенсаторе давления группами трубчатых электронагревателей (ТЭН).

Номера групп ТЭНов	Мощность, кВт	Включение, МПа	Отключение, МПа
1 группа	270	$\leq 15,9$	$\geq 16,2$
	90	$\leq 15,9$	$\geq 16,1$
2 группа	270	$\leq 15,8$	$\geq 16,0$
3 группа	720	$\leq 15,7$	$\geq 15,9$
4 группа	1170	$\leq 15,7$	$\geq 15,9$

Моделирование цифровой системы автоматического регулирования давления в компенсаторе объема

Для описания динамических процессов, происходящих в КД, используют математические модели с сосредоточенными параметрами, подобное моделирование проводилось авторами в работе [6]. Контролируемые параметры в модели КД – это давление, уровень, температура пара, температура воды. Однако авторы отмечают, что в математической модели КД, с регулируемыми параметрами по давлению и уровню, используется входное воздействие – средняя средняя температура теплоносителей 1-го контура, а в реальном объекте управления возмущающими воздействиями на давление являются изменение реактивности реактора ρ и расход пара D на турбину. При данных возмущениях (ρ и D) динамические свойства КД являются нелинейными и могут быть описаны передаточными функциями инерционных звеньев 1-го порядка и звена чистого запаздывания, как показано на рис. 3.

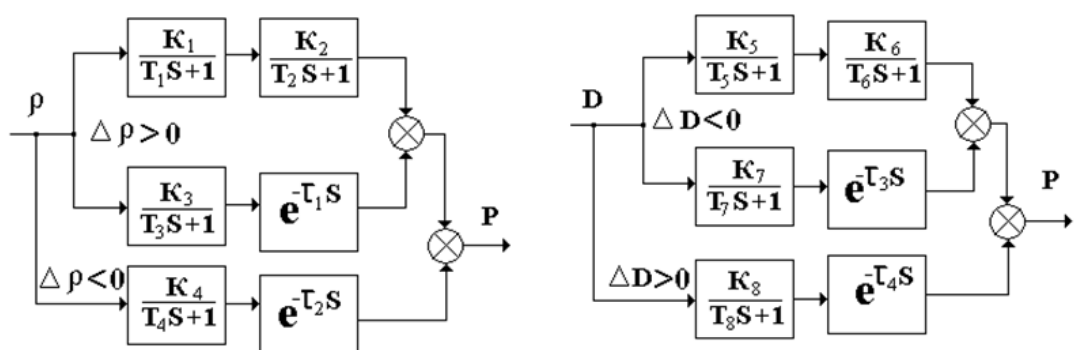


Рис. 3. Структурная схема модели КО по давлению (P) по каналам реактивности (ρ) и расхода пара (D) [7]: $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8$ – коэффициенты передаточных функций; $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8$ – постоянная времени; $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ – время запаздывания

Имитационная модель динамики изменения давления в КД синтезирована с учетом модели КО, предложенной в работе [6], и реализована в программной среде SimInTech [7]. С помощью модели имитируются два режима работы КД (при повышении и понижении давления). На рис. 4 показана схема для случая, когда на систему воздействует возмущение ($\Delta D < 0$), давление в КД падает, работают ТЭНы.

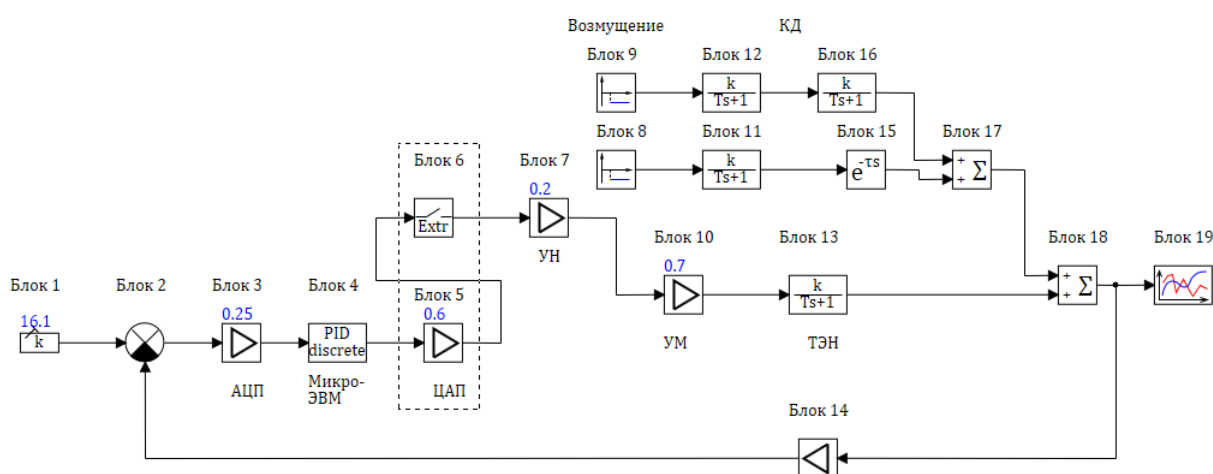


Рис.4. – Структурная схема непрерывно-дискретной модели цифровой САР давления в КД при возмущении расходом пара на турбину (при $D < 0$)

Структурная схема (рис. 4) включает следующие типовые блоки: 1 – константа – формирует на выходе заданную постоянную величину – уставку по давлению; 2 – сравнивающее устройство; 3,5 – соответственно аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) – связующие блоки между непрерывной частью системы автоматического регулирования (САР) и микро – электронно-вычислительной машиной (ЭВМ), выполняют умножение входной величины на заданный коэффициент; 4 – микро-ЭВМ – дискретный пропорционально-

интегральный (ПИ) регулятор – реализует передаточную функцию дискретного ПИ–регулятора; 6 – экстраполятор – выполняет экстраполяцию нулевого порядка; 7, 10, 14 – усилители – усиливают входной сигнал, путем умножения входной величины на заданный коэффициент; 8, 9 – ступенька – формирует значение выходного сигнала – возмущение на КД из-за изменения давления пара на турбину; 11, 12, 13, 16 – инерционное звено 1–го порядка; 15 – идеальное транспортное запаздывание; 17, 18 – сумматоры; 19 – временной график отображает текущие результаты моделирования в виде временной зависимости для одной (или нескольких) переменных.

Вторая структурная схема (рис. 5) характеризует возмущение ($\Delta D > 0$), при этом давление в КД растет и включен впрыск в КД.

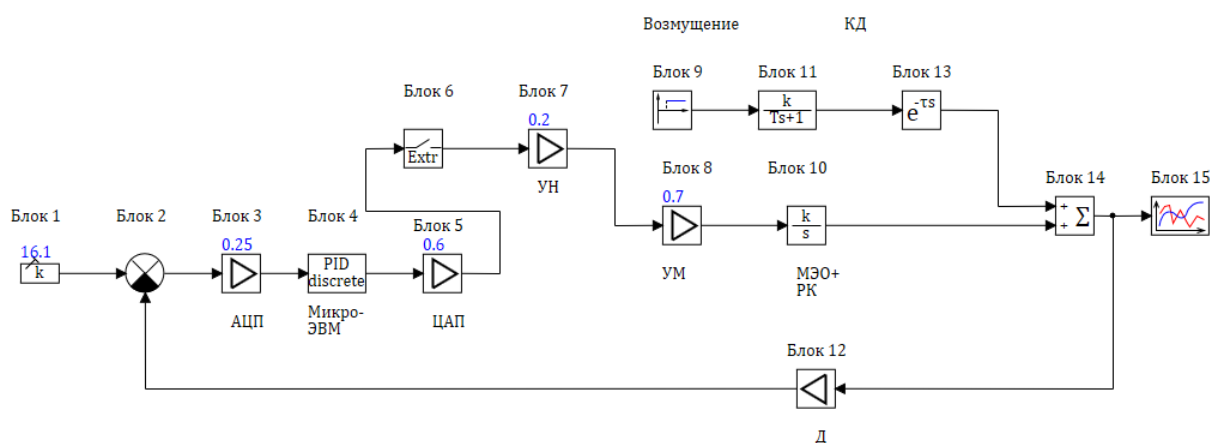


Рис. 5. – Структурная схема непрерывно-дискретной модели цифровой САР давления в КД при возмущении расходом пара на турбину (при $D > 0$): АЦП – аналого–цифровой преобразователь; микро–ЭВМ – микро электронно–вычислительная машина; ЦАП – цифро–аналоговый преобразователь; УН, УМ – соответственно электронный усилитель напряжения и мощности; МЭО + РК – соответственно механизм электрический однооборотный и регулирующий клапан; КД – компенсатор давления

В результате моделирования получены графики переходных процессов цифровой САР (рис. 6) при возмущающем воздействии, которое реализовано в виде ступенчатого сигнала. По виду полученных переходных характеристик произведена количественная оценка качества процесса регулирования. Принималось, что переходный процесс считается удовлетворительным, если регулируемая величина совершает не более трех колебаний вблизи нового положения равновесия [8]. Также, при расчете показателей качества учитывалось, что перерегулирование не должно превышать 20 %.

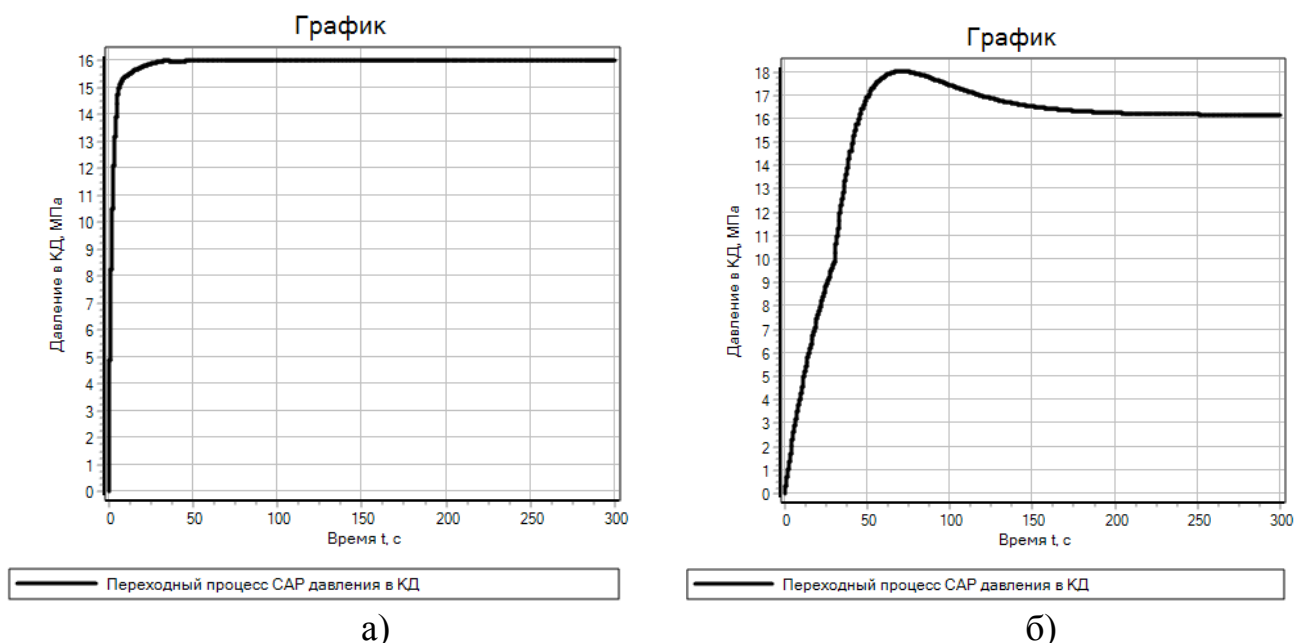


Рис. 6. – Переходный процесс в САР уровня в КД: а) при возмущении расходом пара на турбину (при $D < 0$); б) при возмущении расходом пара на турбину (при $D > 0$)

Результаты расчетов показателей качества переходных процессов представлены в таблице № 2.

Полученные результаты подтверждают, что модель САР давления в КД – устойчивая. Время регулирования по двум канала регулирования

различно, быстродействие выше по каналу «мощность нагревателей – давление в контуре». При регулировании по каналу «впрыск – воды – давление в контуре» присутствует перерегулирование ($12,4 \% < 20 \%$), но количество колебаний меньше трех, что соответствует требуемым показателям качества САР, следовательно, качество регулирования представленной модели можно считать удовлетворительными.

Таблица № 2.

Расчетные значения показателей качества переходных процессов в САР уровня в компенсаторе давления при возмущении расходом пара на турбину.

Показатель	Переходный процесс при $D < 0$	Переходный процесс при $D > 0$
Время регулирования T_p , с	56	250
Относительное значение статической ошибки	0,005	0
Перерегулирование σ , %	-	12,4
Количество перерегулирований, n	-	1

Имитационная модель САР давления в КД синтезирована классическим методом, составлена из структурных элементов – блоков, в соответствие каждому из которых можно поставить передаточную функцию. Однако, применение классических методов синтеза, как правило, предполагает, что объекты управления описываются линейными динамическими звеньями невысокого (обычно не выше третьего) порядка. Указанное допущение часто приводит к тому, что классические регуляторы на практике не обеспечивают заданные показатели качества управления [9].

Качественного улучшения характеристик САР можно добиться путем перехода от традиционного способа регулирования с применением пропорционально – интегрально – дифференцирующего регулятора к адаптивному регулированию, получив при этом возможность изменять параметры регулятора, в зависимости от изменения параметров объекта управления или внешних возмущений, действующих на объект управления. Одним из наиболее перспективных направлений является адаптивное регулирование с применением нейрорегуляторов. Особенно актуально, как отмечают авторы в работе [10], использование динамических нейронных сетей (НС), обладающих способностью, в отличие от статических искусственных нейронных сетей, адаптировать свою структуру и параметры к входным данным за счет процесса обучения.

НС позволяют устранить количественную неопределенность информации, поскольку после обучения могут за счет интерполяции (эмуляции) и экстраполяции (адаптации и прогнозирования) входо – выходных характеристик физического объекта выдавать верное решение для получения новой информации, не входящей в обучающий набор [11].

Структурная схема САР давления в КД может быть реализована по принципу нейронного прогностического управления [12, 13], подобная структура представлена на рис. 7.

Система нейронного обобщенного прогностического управления (Neural Generalized Predictive Control (NGPC)) запускается по входному сигналу $r(n)$, который подается на эталонную модель. Эта модель выдает заданный сигнал $ym(n)$, который используется в качестве входного сигнала для блока адаптации (Cost Function Minimization (CFM)). Задача блока адаптации состоит в том, чтобы откорректировать выходной параметр $u(n)$ так, чтобы ошибка выхода была бы минимальной для i -го момента времени. Выходной сигнал блока адаптации используются либо в качестве входных

данных для объекта управления (ОУ) либо для модели ОУ. Переключатель с двумя положениями S переключится на выдачу управляющего воздействия на ОУ в том случае, когда блок адаптации выдаст наилучший сигнал $u(n)$, который будет оптимальным для обеспечения заданных показателей качества. Между выборками переключатель устанавливается на модель ОУ, а блок адаптации использует эту модель для определения следующего управляющего сигнала $u(n+1)$, на основе прогнозов отклика из модели ОУ.

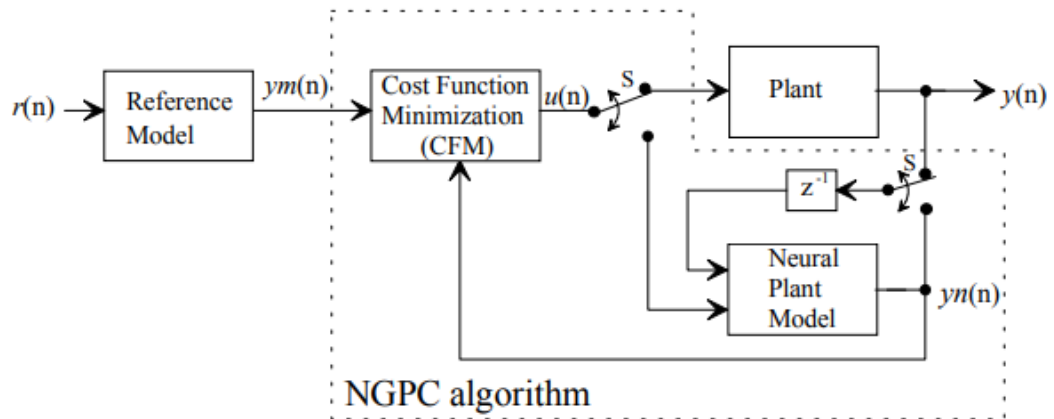


Рис. 7. – Структурная схема нейронного обобщенного прогностического управления – Neural Generalized Predictive Control (NGPC) и алгоритм [12, 13]: эталонная модель – Reference Model; блок адаптации – Cost Function Minimization (CFM); объект управления – Plant; нейронная модель объекта управления – Neural Plant Model; алгоритм нейронного обобщенно прогностического управления – algorithm NGPC.

Система NGPC требует значительного объема вычислений, поскольку алгоритм оптимизации выполняется во время каждой выборки для расчета оптимального управляющего сигнала на ОУ, но таким образом могут быть получены желаемые показатели качества систем регулирования, задействованных на объектах повышенной опасности, таких, как АЭС.

Литература

1. Андрушечко С.А., Васильев Б.Ю., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Кучумов А.Ю., Украинцев В.Ф., Фаворов Б.Ю. ВВЭР–1200: эволюция классики. Физические основы эксплуатации, системы и элементы, ядерное топливо, безопасность // Монография. М.: Логос, 2019. 672 с.

2. Лаврентичев Д.В., Тверской Ю.С. Технология разработки и оценки меры адекватности всережимной динамической математической модели первого контура энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 // Автоматизация в промышленности. 2015. № 6. С. 41–44.

3. Мефедова Ю.А., Збинякова В.Ю. Использование имитационного моделирования для анализа системы компенсации давления АЭС // Вестник КРСУ. 2021. Т. 21, № 8. С. 39–44.

4. Тямалов А.А., Дубченко Я.А. Особенности управления технологическими параметрами системы компенсации давления АЭС с реактором ВВЭР // Глобальная ядерная безопасность. 2014. №2 (11). С. 98–103.

5. Основное оборудование реакторного отделения. Компановка здания реакторного отделения. Балаково: БАЭС, ЦПП, 2000. 186 с.

6. Демченко В.О. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса: Астропринт, 2001. 308 с.

7. Карташов Б.А., Шабаетв Е.А., Козлов О.С., Щекатуров А.М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования. М.: ДМК Прогресс, 2017. 424 с.

8. Емельянов Р.Т., Прокопьев А.П., Баранова Г.П., Фролов И.А., Пиндур С.В. Автоматизированная нейро–нечеткая система управления приводом шнекового дозатора печатающей головки 3D-принтера // Инженерный вестник Дона, 2023, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8204.

9. Андриевская Н.В., Резников А.С., Черанев А.А. Особенности применения нейро–нечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11(7). С. 1445–1449.

10. Царькова Е.Г. Математическая модель искусственной нейронной сети для управления робототехническим комплексом в экстремальных условиях // *Инженерный вестник Дона*, 2022, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8026.

11. Мухопад Ю.Ф., Пашков Н.Н., Сизых В.Н. Адаптивный подход к нейронному управлению одним классом абсолютно устойчивых систем // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 8 (часть 1). С. 139–147.

12. Soloway D., Haley P. J. Neural generalized predictive control // *Proc. 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 1996. pp. 277–281.

13. Sadhana Chidrawar, Balasaheb Patre. Generalized Predictive Control and Neural Generalized Predictive Control // *Leonardo Journal of Sciences*, 2008, №13. pp. 133-152.

References

1. Andrushechko S.A., Vasil'ev B.Yu., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Kuchumov A.Yu., Ukraintsev V.F., Favorov B.Yu. VVER–1200: evolutsiya klassiki. Fizicheskie osnovy ekspluatatsii, sistemy i elementy, yadernoe toplivo, bezopasnost'. Monografiya [WVER-1200: the evolution of the classics. Physical fundamentals of operation, systems and elements, nuclear fuel, safety]. Moskva: Logos, 2019. 672 p.

2. Lavrentichev D.V., Tverskoy Yu.S. Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2015. № 6. pp. 41–44.

3. Mefedova Yu.A., Zbinyakova V.Yu. Vestnik KRSU. 2021. Vol. 21, № 8. pp. 39–44.

4. Tyamalov A.A., Dubchenko Ya.A. Global'naya yadernaya bezopasnost'. 2014. №2 (11). pp. 98–103.
 5. Osnovnoe oborudovanie reaktornogo otdeleniya. Kompanovka zdaniya reaktornogo otdeleniya [The main equipment of the reactor compartment. Arrangement of the reactor compartment building]. Balakovo: BAES, TSPP, 2000. 186 p.
 6. Demchenko V.O. Avtomatizatsiya i modelirovanie tekhnologicheskikh protsesov AES i TES [Automation and modeling of technological processes of NPP and TPP]. Odessa: Astroprin, 2001. 308 p.
 7. Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech: praktikum po modelirovaniyu system avtomaticheskogo regulirovaniya [SimInTech dynamic modeling environment for technical systems: workshop on automatic control system modeling]. Moscow: DMK Progress, 2017. 424 p.
 8. Emel'yanov R.T., Prokop'ev A.P., Baranova G.P., Frolova I.A., Pindur S.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8204.
 9. Andrievskaya N.V., Reznikov A.S., Cheranov A.A. Fundamental'nye issledovaniya. 2014. № 11(7). pp. 1445-1449.
 10. Tsar'kova E.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8026.
 11. Mukhopad Yu.F., Pashkov N.N., Sizykh V.N. Fundamental'nye issledovaniya. 2011. № 8 (part 1). pp. 139-147.
 12. Soloway D., Haley P. J. Proc. 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control. 1996. pp. 277–281.
 13. Sadhana Chidrawar, Balasaheb Patre. Leonardo Journal of Sciences. 2008. №13. pp. 133–152.
-