

А. Н. С и з о в, Ю. П. К о р н ю ш и н,
Е. А. М у с а т о в

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА РАБОТЫ ДЕАЭРАЦИОННО-ПИТАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЭЦ

Проанализированы автоколебательные процессы в деаэрационно-питательной системе ТЭЦ, для чего разработана новая математическая модель, а проекционно-матричный метод анализа и синтеза автоматических систем распространен для случая систем с большим количеством нелинейных элементов. Решена задача параметрического синтеза.

Исследования динамических процессов в деаэрационно-питательной системе (ДПС) ТЭЦ ОАО “Калужский турбинный завод” в процессе эксплуатации позволили выявить некоторые особенности ее функционирования (рис. 1).

На режимах малых нагрузок в трубопроводах гидросистемы питания парогенератора имели место пульсации давления и расхода, носившие характер низкочастотных колебаний большой амплитуды, приводившие к аварийным ситуациям. Пульсации давления возникали на режимах работы питательного насоса на расходах, близких к 60 % номинальной величины и при меньших значениях. При этом сам насос (ПЭ 160-140) на стендовых испытаниях без нагрузки показал

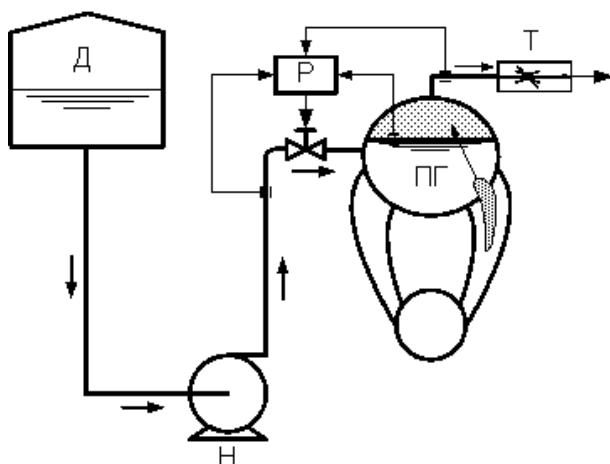


Рис. 1. Функциональная схема ДПС ТЭЦ:

Д — деаэрактор; Н — питательный насос ПЭ 160-140; Р — регулятор подачи питательной воды в парогенератор; ПГ — парогенератор (паровой котел БКЗ-125)

устойчивую работу с качеством, удовлетворявшим требованиям статического режима, в том числе и на малых подачах.

Как показывает опыт эксплуатации энергетического оборудования [1–4], проблема пульсаций давления в линиях подачи питательной воды может возникать на многих тепловых и атомных электростанциях, питательные насосы в которых в периоды сезонных разгрузок эксплуатируются на подачах, меньших 30 % номинальной величины. Традиционно такую проблему решают, вводя в линию нагнетания контур рециркуляции [1, 4], либо устанавливая дополнительный насос в системе питания. Однако подобное решение задачи снижает экономичность и усложняет систему в целом.

Постановка задачи исследования. Исходя из существующей проблемы, была сформулирована следующая цель настоящей работы: исследовать поведение и принять меры к устранению автоколебательных режимов работы и повышению качества работы в статическом режиме заданной сложной, существенно нелинейной системы автоматического управления (деаэрационно-питательной системы ТЭЦ) путем синтеза регулятора подачи питательной воды. Для этого необходимо разработать математическую модель ДПС ТЭЦ, как можно более полно отражающую свойства реальной системы, учитывающую ее нелинейные характеристики. Кроме того, учитывая сложность такой модели, необходимо, используя известные методы анализа и синтеза, выбрать наиболее рациональный вариант, учитывая особенности рассматриваемой задачи.

Разработка математической модели. Для решения поставленной задачи была разработана математическая модель всей системы “деаэратор–питательный насос–трубопроводы–паровой котел–нагрузка”, описываемая нелинейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. В ее основе лежит кинетическая модель, разработанная В.В. Пилипенко [3], в которой вместо кавитационных каверн учитывается паровой объем котла над зеркалом испарения, так как в данном случае известно, что питательный насос в рассматриваемой системе работал на бескавитационных режимах. В основе уравнений модели лежит уравнение Бернулли для нестационарного потока сжимаемой жидкости (являющееся, в свою очередь, частным случаем уравнений Навье–Стокса [1]), а также уравнение баланса расходов. В частности, новым является вывод уравнения баланса расходов парогенератора в контексте только гидродинамических процессов, протекающих в нем, в силу их гораздо меньшей инерционности, по сравнению с тепловыми процессами¹. Модель учитывает

¹Обоснование такого допущения можно найти, например, в работе В.А. Иванова [2].

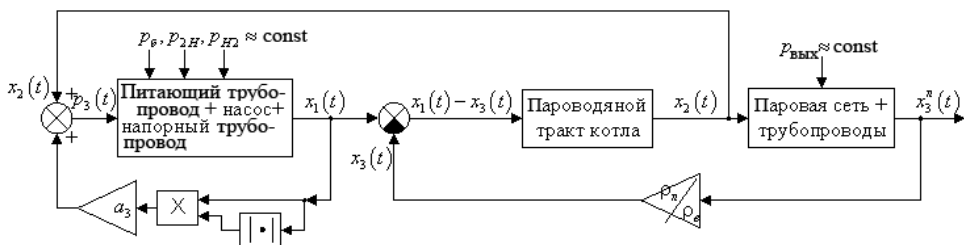


Рис. 2. Структурно-функциональная схема ДПС ТЭЦ (укрупненно)

нестационарность потока, емкостные свойства трубопроводов, плотность и сжимаемость перекачиваемой жидкости. На рис. 2 приведена структурно-функциональная схема ДПС ТЭЦ.

Анализ автоколебаний в ДПС ТЭЦ. Полученная математическая модель является сложной и существенно нелинейной (содержит 8 нелинейных элементов), что создает предпосылку для возникновения в системе, описываемой такой моделью, автоколебательных режимов работы. Как показывают экспериментальные данные (рис. 3), в реальной ДПС ТЭЦ на режиме подачи Q питательной воды около $90 \text{ м}^3/\text{ч}$ (около 60 % номинального значения Q) наблюдались сильные низкочастотные колебания питающего и напорного трубопроводов, а также вибрации отдельных элементов системы.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что частота колебаний лежит в пределах $0,8 \dots 1,2 \text{ Гц}$, а их амплитуда может достигать $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ (по расходу) и 3 МПа (по давлению), что приблизительно составляет 50 % и 20 % соответственно от номинальных значений расхода и давления. Амплитуда наблюдаемых низкочастотных колебаний оказалась настолько велика, что работа системы сопровождалась разрушением несущих конструкций трубопроводов. Имитационное моделирование в системе Simulink пакета Matlab, проводимое по методу Рунге–Кутты, подтвердило возможность возникновения автоколебаний в такой системе и даже позволило выявить некоторые зависимости их частоты и амплитуды от параметров системы. Данный результат, однако, не давал ответа на вопрос о причине их возникновения, равно как и не решал задачи их устранения. Для решения указанной задачи, учитывая ее особенности (сложность, большое количество нелинейных элементов) и анализируя методы теории автоматического управления, которые широко применяются в настоящее

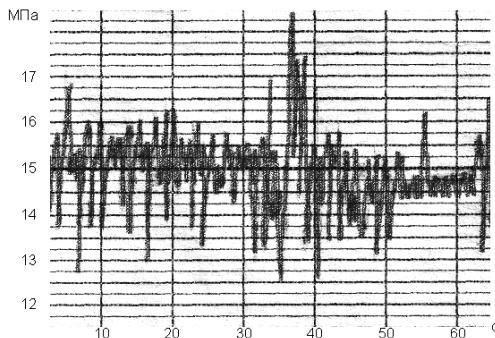


Рис. 3. Осциллограмма давления в нагнетательном трубопроводе перед регулирующей задвижкой

время как для анализа ДПС ТЭЦ, так и для синтеза регулятора подачи питательной воды для нее, наиболее рационально воспользоваться проекционно-матричным методом [5, 6]. Этот метод, ориентированный на решение задачи параметрического синтеза путем сведения ее к задаче оптимизации, может быть применен к широкому классу систем, в том числе и нелинейных. Одним из ориентированных на использование ЭВМ методов аппроксимации бесконечно-мерных задач конечно-мерным является представление функций в базисах или использование сеточно-матричного метода подхода, что приводит к необходимости применения проекционно-матричного метода или сеточно-матричного метода. Эти методы оперируют матричными операторами интегрирования, умножения и дифференцирования в выбранном базисе, что удобно, если известна структурная схема системы. Аппроксимировав различные условия задачи (функционалы, ограничения и т.п.), можно перейти от исходной непрерывной ее формулировки к приближенной конечно-мерной задаче, которую можно решить с помощью хорошо разработанного аппарата численных методов, используя вычислительную технику. Причина популярности техники матричных операторов — в ее исключительной простоте: сложные системы интегральных или дифференциальных уравнений почти механически сводятся к системам алгебраических уравнений. В этом плане аппарат матричных преобразований чем-то близок популярному операционному методу, но, в отличие от операционного метода, область его применения значительно шире, поскольку охватывает такой класс систем, как системы с переменными параметрами.

Указанный аппарат достаточно подробно изложен в работе [6]. Будучи распространен на класс нелинейных систем, он позволяет применить спектральные методы к системам с несколькими нелинейными элементами. Для этого необходимо, в первую очередь, применить итерационный подход.

Пусть имеется следующая нелинейная система:

$$\sum_{k=0}^n a_k(t) x^{(k)}(t) + F(x(t)) = \sum_{k=0}^m b_k(t) y^{(k)}(t). \quad (1)$$

Перейдем к соответствующему интегральному уравнению:

$$\int_0^T k_x(t, \tau) x(\tau) d\tau + \int_0^T k_f(t, \tau) F(x(t)) d\tau = \int_0^T k_y(t, \tau) y(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где

$$k_x(t, \tau) = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{(n)!} \frac{d^k}{d\tau^k} [a_k(\tau) (t - \tau)^n];$$

$$k_y(t, \tau) = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{(n)!} \frac{d^k}{d\tau^k} [b_k(\tau) (t - \tau)^n];$$

$$k_f(t, \tau) = \frac{1}{n!} (t - \tau)^n.$$

Вспользуемся следующим представлением:

$$\begin{aligned} x(t) &= \Phi^T(t) C^x; \\ y(t) &= \Phi^T(t) C^y; \\ F(x(t)) &= \Phi^T(t) C^{xf}; \\ k_x(t, \tau) &= \Phi^T(t) A^x \Phi(\tau); \\ k_y(t, \tau) &= \Phi^T(t) A^y \Phi(\tau); \\ k_f(t, \tau) &= \Phi^T(t) A^f \Phi(\tau). \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Phi(t) = \{\varphi_i(t) : i = 0, 1, \dots\}$ — ОНБ в $L^2[0, T]$;

$$C^x = [c_0^x \ c_1^x \ \dots \ c_l^x]^T, \quad c_i^x = \int_0^T x(t) \varphi_i(t) dt, \\ i = 0, 1, \dots, l, \dots;$$

$$C^y = [c_0^y \ c_1^y \ \dots \ c_l^y]^T, \quad c_i^y = \int_0^T y(t) \varphi_i(t) dt, \\ i = 0, 1, \dots, l, \dots; \quad (4)$$

$$C^{xf} = [c_0^{xf} \ c_1^{xf} \ \dots \ c_l^{xf}]^T, \quad c_i^{xf} = \int_0^T F(x(t)) \varphi_i(t) dt, \\ i = 0, 1, \dots, l, \dots;$$

$$\left\{ \begin{aligned} A^x &= \left[\int_0^T \int_0^t k_x(t, \tau) \varphi_i(t) \varphi_j(\tau) dt d\tau \right]_{i,j=0}^{\infty}; \\ A^y &= \left[\int_0^T \int_0^t k_y(t, \tau) \varphi_i(t) \varphi_j(\tau) dt d\tau \right]_{i,j=0}^{\infty}; \\ A^f &= \left[\int_0^T \int_0^t k_f(t, \tau) \varphi_i(t) \varphi_j(\tau) dt d\tau \right]_{i,j=0}^{\infty}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Из выражений (2) и (3) следует

$$\Phi^T(t) C^x + \int_0^T \Phi^T(t) A^x \Phi(\tau) \Phi^T(\tau) C^x d\tau +$$

$$+ \int_0^T \Phi^T(t) A^f \Phi(\tau) \Phi^T(\tau) C^{x_f} d\tau = \int_0^T \Phi^T(t) A^y \Phi(\tau) \Phi^T(\tau) C^y d\tau,$$

или, что то же самое,

$$\begin{aligned} \Phi^T(t) C^x + \Phi^T(t) A^x \int_0^T \Phi(\tau) \Phi^T(\tau) d\tau C^x + \\ + \Phi^T(t) A^f \int_0^T \Phi(\tau) \Phi^T(\tau) d\tau C^{x_f} = \\ = \Phi^T(t) A^y \int_0^T \Phi(\tau) \Phi^T(\tau) d\tau C^y. \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку $\int_0^T \Phi(\tau) \Phi^T(\tau) d\tau = I$ — единичная матрица, то из соотношений (6) получим

$$A^x C^x + A^f C^{x_f} = A^y C^y. \quad (7)$$

Найдем связь между C^x и C^{x_f} . Имеем

$$x_f(t) = F(x(t)) \approx F\left(\sum_{i=0}^l c_i^x \varphi_i(t)\right) = F(\Phi^T(t) C^x). \quad (8)$$

Умножим левую и правую части уравнения (8) на $\varphi_i(t)$, проинтегрируем и получим

$$\int_0^T x_f(t) \varphi_i(t) dt = \int_0^T F(\Phi^T(t) C^x) \varphi_i(t) dt, \quad i = \overline{0, l},$$

или

$$c_i^{x_f} = \int_0^T F(\Phi^T(t) C^x) \varphi_i(t) dt, \quad i = \overline{0, l}. \quad (9)$$

Интегралы в уравнении (9) заменим квадратурной формулой. Выберем простейшую квадратуру — метод трапеций. Для этого разобьем отрезок интегрирования $[0, T]$ на $(n - 1)$ равных частей $[t_1, t_2], [t_2, t_3], \dots, [t_{n-1}, t_n]$, где $t_1 = 0, t_n = T, t_i = (i - 1)h, h = T/(n - 1)$. Тогда уравнение (9) можно с требуемой степенью

точности представить следующим образом:

$$c_i^{x_f} = \sum_{k=1}^n a_k F(\Phi^T(t_k) C^x) \varphi_i(t_k), \quad i = \overline{0, l},$$

где

$$a_k = \begin{cases} 1/2, & k = 1, n, \\ 1, & 1 < k < n, \end{cases}$$

или в матричной форме

$$C^{x_f} = \sum_{k=1}^n a_k F(\Phi^T(t_k) C^x) \Phi(t_k), \quad (10)$$

где $\Phi(t_k) = [\varphi_0(t_k), \dots, \varphi_l(t_k)]^T$.

Тогда уравнение (7) можно записать следующим образом:

$$A^x C^x + A^f \sum_{k=1}^n a_k F(\Phi^T(t_k) C^x) \Phi(t_k) = A^y C^y. \quad (11)$$

Полученное выражение (11) представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений, решить которую можно известными численными методами, например методом Гаусса–Ньютона или Левенберга–Марквардта [7].

Если нелинейная система задана структурной схемой, то аналогично случаю линейных нестационарных систем, строится аппарат структурных преобразований при применении итерационных процедур.

Исходя из сказанного, можно получить общий алгоритм анализа поведения нелинейной модели САУ при помощи проекционно-матричного метода (рис. 4).

Указанный алгоритм был применен для анализа рассматриваемой ДПС ТЭЦ, в качестве базисных были выбраны тригонометрические, а затем и блочно-импульсные функции (локальные сплайны нулевого и первого порядка [8]).

Сравнение результатов расчетов, выполненных по проекционно-матричному методу и по методу Рунге–Кутты 4-5-го порядка с переменным шагом, представлено в табл. 1. В дальнейшем условимся называть решение, полученное численным методом Рунге–Кутты, точным, а решение, полученное по методу матричных операторов, — приближенным. В табл. 1 введены обозначения: D — абсолютная ошибка между точным и приближенным решением в данный момент времени; d — относительная ошибка.

Как видно из табл. 1, проекционно-матричный метод показал приемлемую для инженерных расчетов точность для всех используемых

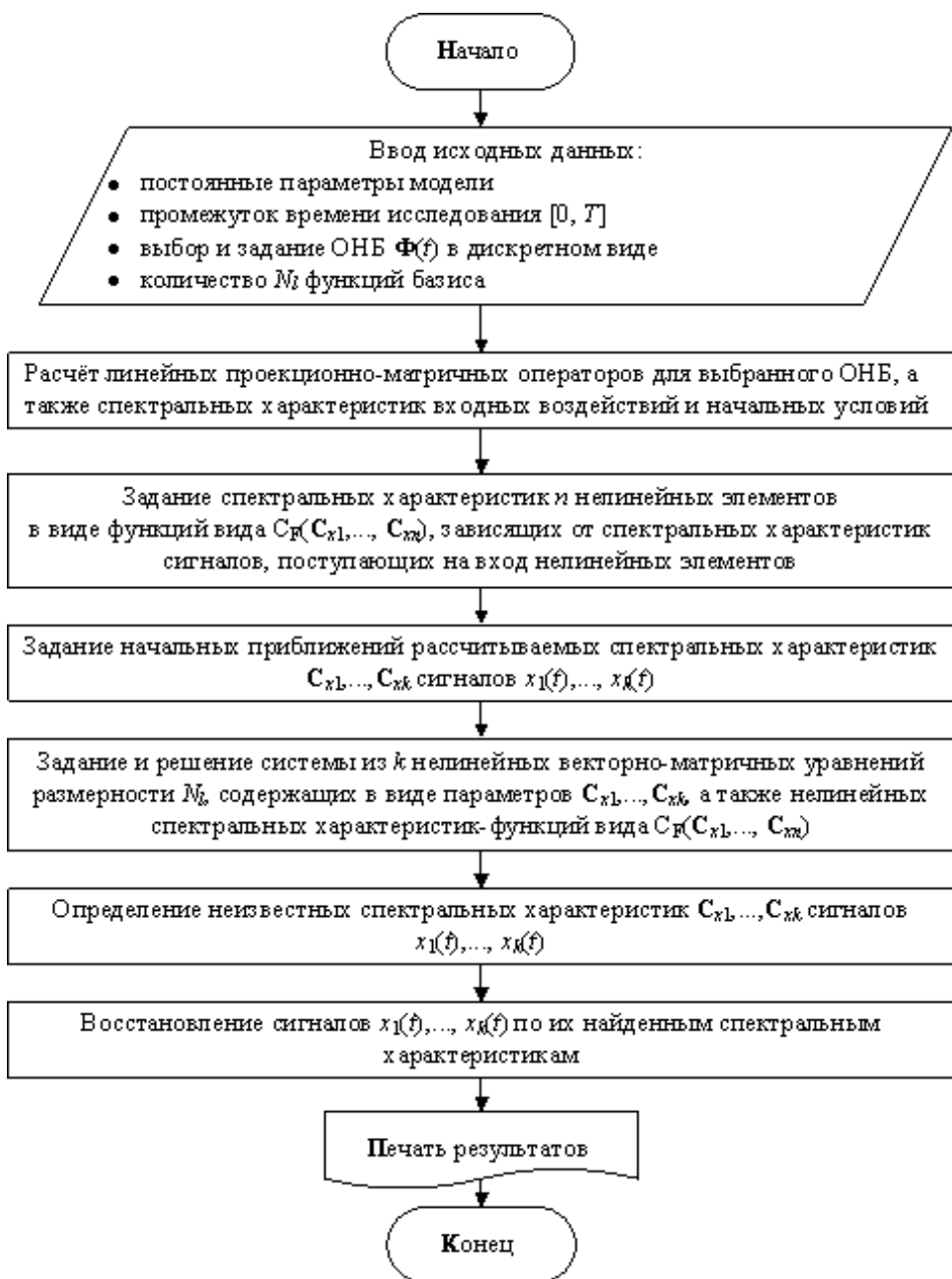


Рис. 4. Общий алгоритм исследования поведения САУ проекционно-матричным методом

базисов. Если сравнивать между собой результаты анализа по трем базисам, то стоит отметить более высокую точность при использовании базиса из блочно-импульсных функций, что может быть объяснено известными [5] преимуществами БИФ.

Некоторое расхождение точного и приближенного решений для базиса из кусочно-линейных функций может быть объяснено тем, что

Сравнение результатов анализа математической модели ДПС ТЭЦ различными методами

№ п/п	Точное решение методом Рунге-Кутты			Приближенное решение проекционно-матричным методом в базе							
	t_i	x_{5i}	x_{15i}	БИФ		КЛФ		тригонометрических функций			
		$D, \text{ абс}$	$d, \%$	x_{15i}	$D, \text{ абс}$	$d, \%$	x_{15i}	$D, \text{ абс}$	$d, \%$		
1	0,1	$2,809 \cdot 10^6$	$2,814 \cdot 10^6$	$5,000 \cdot 10^3$	$0,18$	$2,756 \cdot 10^6$	$5,300 \cdot 10^4$	$1,89$	$3,167 \cdot 10^6$	$3,580 \cdot 10^5$	$12,74$
2	0,2	$5,724 \cdot 10^6$	$5,616 \cdot 10^6$	$1,080 \cdot 10^5$	$1,89$	$5,673 \cdot 10^6$	$5,100 \cdot 10^4$	$0,89$	$5,393 \cdot 10^6$	$3,310 \cdot 10^5$	$5,78$
3	0,3	$8,356 \cdot 10^6$	$8,449 \cdot 10^6$	$9,300 \cdot 10^4$	$1,11$	$8,303 \cdot 10^6$	$5,300 \cdot 10^4$	$0,63$	$7,894 \cdot 10^6$	$4,620 \cdot 10^5$	$5,53$
4	0,4	$1,051 \cdot 10^7$	$1,051 \cdot 10^7$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,00$	$1,047 \cdot 10^7$	$4,000 \cdot 10^4$	$0,38$	$1,017 \cdot 10^7$	$3,400 \cdot 10^5$	$3,24$
5	0,5	$1,231 \cdot 10^7$	$1,243 \cdot 10^7$	$1,200 \cdot 10^5$	$0,97$	$1,227 \cdot 10^7$	$4,000 \cdot 10^4$	$0,32$	$1,222 \cdot 10^7$	$9,000 \cdot 10^4$	$0,73$
6	0,6	$1,368 \cdot 10^7$	$1,368 \cdot 10^7$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,00$	$1,367 \cdot 10^7$	$1,000 \cdot 10^4$	$0,07$	$1,385 \cdot 10^7$	$1,700 \cdot 10^5$	$1,24$
7	0,7	$1,470 \cdot 10^7$	$1,467 \cdot 10^7$	$3,000 \cdot 10^4$	$0,20$	$1,467 \cdot 10^7$	$3,000 \cdot 10^4$	$0,20$	$1,501 \cdot 10^7$	$3,100 \cdot 10^5$	$2,11$
8	0,8	$1,544 \cdot 10^7$	$1,545 \cdot 10^7$	$1,000 \cdot 10^4$	$0,06$	$1,543 \cdot 10^7$	$1,000 \cdot 10^4$	$0,06$	$1,563 \cdot 10^7$	$1,900 \cdot 10^5$	$1,23$
9	0,9	$1,579 \cdot 10^7$	$1,579 \cdot 10^7$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,00$	$1,579 \cdot 10^7$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,00$	$1,531 \cdot 10^7$	$4,800 \cdot 10^5$	$3,04$
10	1	$1,574 \cdot 10^7$	$1,571 \cdot 10^7$	$3,000 \cdot 10^4$	$0,19$	$1,574 \cdot 10^7$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,00$	$7,868 \cdot 10^6$	$7,872 \cdot 10^6$	$50,01$

функции-носители базиса имеют общие точки по краям каждого интервала, а значит, сплайн может осциллировать [8].

Параметрический синтез регулятора ДПС ТЭЦ. Подробное математическое описание применения проекционно-матричного метода для процедуры параметрического синтеза приведено, например, в работе [6]. Приведем лишь собственный алгоритм параметрического синтеза регулятора для нелинейных систем с помощью проекционно-матричного метода в общем виде (рис. 5). Такой алгоритм предполагает задание эталонного переходного сигнала $h_3(t)$ по одной из наблюдаемых в системе фазовых переменных ($x_5(t)$ — давление перед регулирующей задвижкой), например, в виде следующей зависимости:

$$h_3(t) = k_{\text{масш}} \left(1 - e^{-\frac{\xi}{T_k} t} / \sqrt{1 - \xi^2} \sin \left(t \sqrt{1 - \xi^2} / T_k + \arctg \left(\sqrt{1 - \xi^2} / \xi \right) \right) \right), \quad (12)$$

(реакция колебательного звена на ступенчатый входной сигнал $1(t)$).

В качестве меры близости реального $x_5(t)$ и эталонного $h_3(t)$ переходного процесса примем целевую функцию

$$J = \int_0^T [x_5(t) - h_3(t)]^2 dt, \quad (13)$$

где T — верхняя граница интервала исследования, $T = 5$ с.

Представляя рассматриваемую систему в виде матричных операторов в выбранном при анализе базисе, а также используя итерационные процедуры, можно свести задачу расчета главного коэффициента усиления регулятора подачи к задаче оптимизации, для решения которой применяются методы нелинейного программирования.

По указанному общему алгоритму была разработана программа², решающая задачу параметрического синтеза — расчет главного коэффициента усиления $K_{\text{пер}}$ регулятора подачи питательной воды в парогенератор из условия устойчивой работы рассматриваемой ДПС ТЭЦ с заданным качеством работы в статическом режиме. Вопрос выбора структуры регулятора рассматривался отдельно; следует признать, что формализация этой процедуры пока еще представляет значительные трудности [10]. Таким образом, в результате выполнения программы было рассчитано оптимальное значение главного коэффициента настройки регулятора подачи питательной воды в парогенератор, при

²Программа расчетов была написана в среде научных и инженерных расчетов MathCAD. Выбор именно этой среды был обусловлен ее наглядностью и простотой применения для инженера [9].

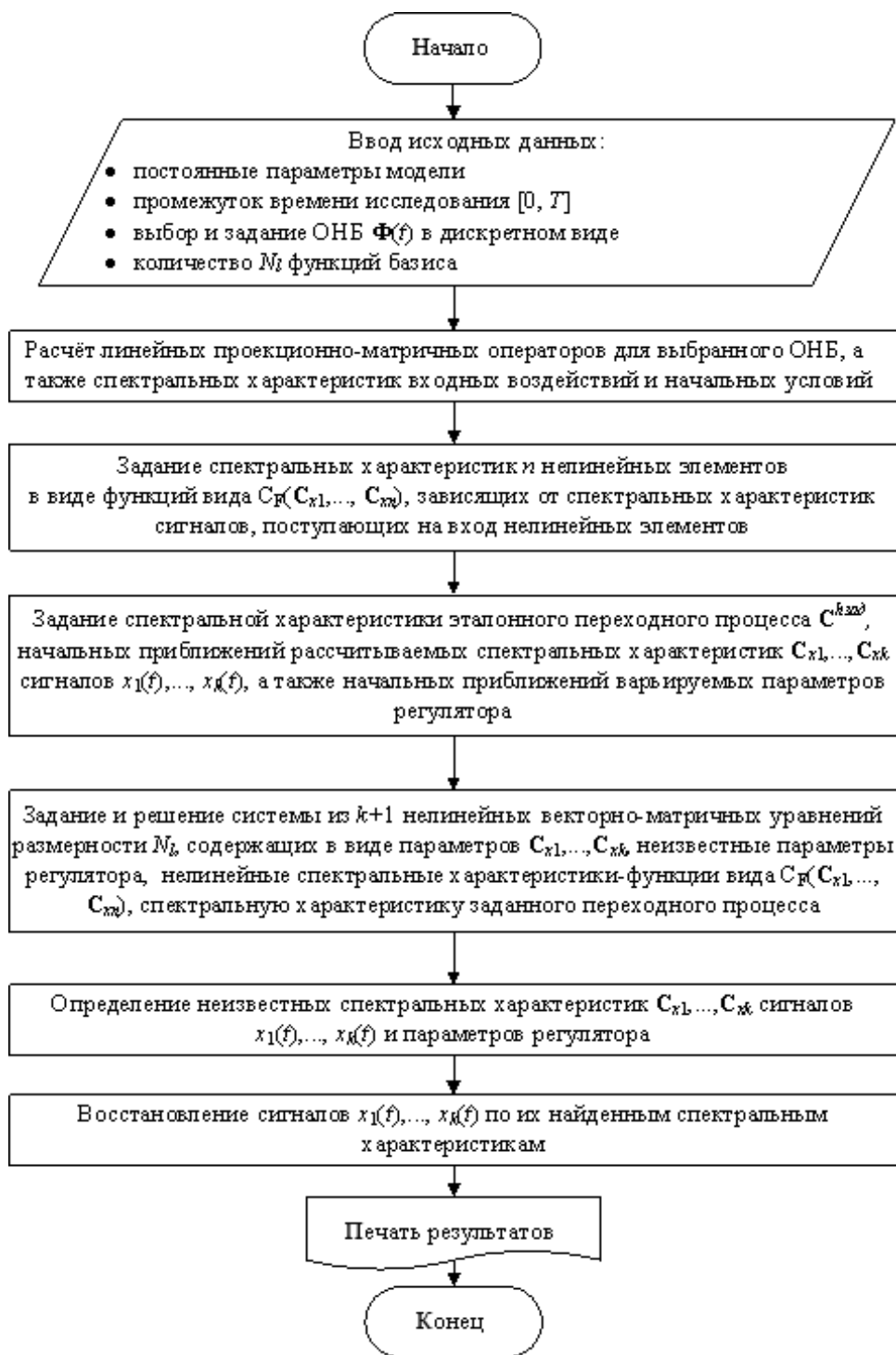


Рис. 5. Алгоритм параметрического синтеза регулятора для нелинейной САУ при помощи проекционно-матричного метода в общем виде

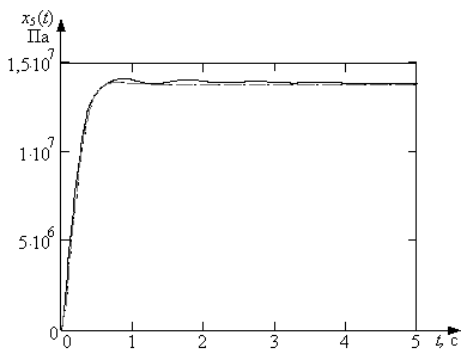


Рис. 6. Результаты расчета сигнала $x_5(t)$ при оптимальном значении $K_{рег}$ по проекционно-матричному методу (---) в сравнении с решением, полученным по методу Рунге-Кутты, (—) при заданном эталонном сигнале (- - - -)

котором в данной системе достигается решение поставленной задачи стабилизации давления в парогенераторе. Как следует из графика (рис. 6), найденное для системы (при оптимальной величине $K_{рег}$) значение сигнала $x_5(t)$ — давление перед регулирующей задвижкой — достаточно точно совпадает с заданным (эталонным) переходным процессом для этого сигнала. В качестве эталонного был принят этот сигнал, потому что именно перед регулирующей задвижкой наблюдались максимальные, а значит, и наиболее опасные, по амплитуде

колебания давления. Результаты сравнения точного и приближенного решений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение точного и приближенного решений задачи синтеза

№п/п	Точное решение методом Рунге-Кутты		Приближенное решение проекционно-матричным методом в базе из БИФ	Заданное значение (эталон)	Погрешность	
	t_i	x_{5i}			x_{15i}	x_{35i}
0	0	0	$1,43 \cdot 10^5$	$1,430 \cdot 10^5$	$1,430 \cdot 10^5$	100,0
1	0,25	$9,719 \cdot 10^6$	$8,82 \cdot 10^6$	$8,820 \cdot 10^6$	$8,990 \cdot 10^5$	10,2
2	0,5	$1,325 \cdot 10^7$	$1,32 \cdot 10^7$	$1,319 \cdot 10^7$	$6,000 \cdot 10^4$	0,5
3	0,75	$1,400 \cdot 10^7$	$1,39 \cdot 10^7$	$1,389 \cdot 10^7$	$1,100 \cdot 10^5$	0,8
4	1	$1,402 \cdot 10^7$	$1,384 \cdot 10^7$	$1,384 \cdot 10^7$	$1,800 \cdot 10^5$	1,3
5	1,25	$1,382 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$2,000 \cdot 10^4$	0,1
6	1,5	$1,391 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,100 \cdot 10^5$	0,8
7	1,75	$1,401 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$2,100 \cdot 10^5$	1,5
8	2	$1,395 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,500 \cdot 10^5$	1,1
9	2,25	$1,387 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$7,000 \cdot 10^4$	0,5
10	2,5	$1,390 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,000 \cdot 10^5$	0,7
11	2,75	$1,394 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,400 \cdot 10^5$	1,0
12	3	$1,390 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,000 \cdot 10^5$	0,7
13	3,25	$1,386 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$6,000 \cdot 10^4$	0,4
14	3,5	$1,388 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$8,000 \cdot 10^4$	0,6
15	3,75	$1,388 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$8,000 \cdot 10^4$	0,6
16	4	$1,386 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$6,000 \cdot 10^4$	0,4

№п/п	Точное решение методом Рунге-Кутты		Приближенное решение проекционно-матричным методом в базисе из БИФ	Заданное значение (эталон)	Погрешность	
	t_i	x_{5i}	x_{15i}	x_{35i}	Δ , абс	δ , %
17	4,25	$1,384 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$4,000 \cdot 10^4$	0,3
18	4,5	$1,385 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$5,000 \cdot 10^4$	0,4
19	4,75	$1,384 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$4,000 \cdot 10^4$	0,3
20	5	$1,383 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$1,380 \cdot 10^7$	$3,000 \cdot 10^4$	0,2

Остальные сигналы $x_1(t) \dots x_8(t)$, рассчитанные проекционно-матричным методом для системы с оптимальным $K_{\text{пер}}$, также незначительно отличаются от точного решения.

Результаты. Решена задача параметрического синтеза регулятора для сложной системы, обладающей большим количеством нелинейных элементов. Подобный подход показал свою эффективность и вполне может быть применен как для линейных, так и нелинейных стационарных или нестационарных систем.

Как показал анализ разработанной математической модели, среди возможных причин возникновения автоколебаний на некоторых режимах работы можно выделить случаи некорректной настройки параметров регулятора, большой протяженности трубопроводов, расположение задвижки регулирующего клапана относительно далеко от насоса (источника энергии в данной системе). Расчетная частота и амплитуда автоколебаний (по графикам) с удовлетворительной точностью совпадают с экспериментально полученными значениями.

Важным выводом можно считать утверждение о возможности появления низкочастотных пульсаций давления и расхода даже в тех гидросистемах, где насос работает устойчиво на всех режимах, включая его работу на западающем участке напорной характеристики. Подтвержден наблюдаемый ранее факт, что частота автоколебаний в такой системе наиболее сильно зависит именно от параметров парового котла, тогда как амплитуда колебаний при этом практически не меняется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Г и д р а в л и к а, гидромашины и гидроприводы: Учеб. для машиностроительных вузов. 2-е изд., перераб. / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – М.: Машиностроение, 1982.
- И в а н о в В. А. Регулирование энергоблоков. – М.: Машиностроение, 1980.
- П и л и п е н к о В. В. Кавитационные автоколебания. – Киев: Наук. думка, 1989.
- Ч е г у р к о Л. Е. Центробежные энергетические насосы, их неисправности и методы устранения. – Челябинск, 2002.
- Л а п и н С. В., Е г у п о в Н. Д. Теория матричных операторов и ее приложение к задачам автоматического управления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 496 с.

6. М е т о д ы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и т.; 2-изд., перераб. и доп. / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
7. Т а р а с и к В. П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 640 с.
8. М а к а р о в В. Л., Х л о б ы с т о в В. В. Сплайн-аппроксимация функций: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. шк., 1983. – 80 с.
9. О ч к о в В. Ф. Mathcad 8 Pro для студентов и инженеров. – М.: Компьютер-Пресс, 1999.
10. М е т о д ы автоматизированного проектирования нелинейных систем / С.К. Коваленко и др.; Под ред. Ю.И. Топчиева. – М.: Машиностроение, 1993. – 576 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (грант № 06-0196306).

Статья поступила в редакцию 26.07.2006

Александр Николаевич Сизов родился в 1978 г., в 2002 г. окончил Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана. Инженер-конструктор ОАО “Калужский турбинный завод”, ассистент кафедры “Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматы” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 научных работ в области динамики автоматических систем и моделирования гидродинамических процессов.

A.N. Sizov (b. 1978) graduated from in 2002. Engineer-designer of the open stock company “Kaluzhskiy turbinniy zavod”. Assistant of the department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 12 publications in the field of dynamics of automatic systems and simulation of hydrodynamic processes.



Юрий Петрович Корнюшин родился в 1950 г. в 1974 г. окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Системы автоматического управления” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 120 научных работ в области математического моделирования систем управления, анализа, идентификация и оптимизации гидроприводов.

Yu.P. Korniyushin (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. D. Sc. (Eng.), professor of the department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 120 publications in the field of mathematical simulation of systems for control, analysis, identification and optimization of hydraulic actuator.



Евгений Анатольевич Мусатов родился в 1937 г., окончил Красноярский Государственный технический университет. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Гидромашины и гидропневмоавтоматы” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области систем управления технических систем, динамических процессов и автоматики.

Ye.A. Musatov (b. 1937) graduated from the Krasnoyarsk State Technical University. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of the department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications in the field of control systems for technical systems, dynamic processes and automatics.