

УДК 681.5; 681.5.01:658.5;

© 2022 г. Л.В. Никифорова, канд. техн. наук,
Д.А. Теличенко, канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО И ПАРАМЕТРИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛЕННЫМ ОБЪЕКТОМ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

В работе рассмотрена проблема создания системы регулирования давления пара в общей паровой магистрали ТЭЦ. Проведен анализ сложностей обеспечения эффективной работы регулятора в условиях практической реализации. На основании экспериментальных данных и полученной структурно и параметрически неопределенной модели объекта с запаздыванием предложено решение по созданию комбинированной системы управления. Выполненное имитационное моделирование показало эффективность предлагаемых решений.

Ключевые слова: главный регулятор, давление в общей паровой магистрали, структурная и параметрическая неопределенность, запаздывание, адаптивная система.

DOI: 10.22250/18142400_2022_72_2_74

Введение

Класс объектов теплоэнергетики достаточно хорошо изучен как с технологической точки зрения, так и с точки зрения конструкций систем управления [1, 2]. В настоящее время комбинированная выработка тепла и электроэнергии на угольных электростанциях снижается, но по-прежнему занимает лидирующие позиции как в нашей стране [3], так и в зарубежном производстве [4]. Исследования показывают, что можно экономически эффективно использовать ТЭС в современных условиях, в том числе снижая выбросы CO_2 [5], внося изменения в сам цикл производства, обеспечивая в том числе и большую эффективность возобновляемых источников энергии в комбинированном режиме [6, 7].

Экономические особенности России накладывают свой отпечаток на

развитие и эксплуатацию угольных ТЭЦ. С одной стороны, намечается нивелирование их роли за счет небольших предприятий и/или водогрейных котельных, работающих на газе [8]. С другой стороны – ужесточение требований системного оператора (СО) к участникам оптового рынка [9] вынуждает искать новые технические решения в части обеспечения работы генерирующего оборудования в условиях отклонения частоты и мощности в энергосистеме.

Необходимо отметить прежде всего важность последнего упомянутого документа [9] для рассматриваемой в настоящей работе системы регулирования давления в общей паровой магистрали как одной из подзадач обеспечения участия в общем или нормированном регулировании частоты (ОПРЧ или НПРЧ) станций с общей паровой магистралью. Собственно, требования к участию в ОПРЧ существовали и ранее, однако с 2017 г. СО предпринимает систематические усилия по регламентированию как оценки данного участия и обязанностей субъектов по ее выполнению, так и формализации критериев неудовлетворительного участия, что в случае признания такого факта состоявшимся принесет огромные финансовые потери генерирующей компании. Всё это потребовало значительной реконструкции структурных схем автоматического регулирования прежде всего на блочных паросиловых [10], парогазовых [11], газотурбинных [12] установках. При этом необходимо отметить достаточно малый объем публикаций, посвященных ТЭЦ с общей паровой магистралью, для которых указанная выше проблема не менее актуальна. Действительно: для выполнения требований к участию в ОПРЧ неблочной ТЭЦ со стороны турбин происходит достаточно резкий, непредсказуемый отбор пара на регулирование, тогда как группа котлов путем изменения расхода топлива должна скомпенсировать это изменение.

Таким образом, настоящая работа продолжает цикл исследований авторов, посвященных теплоэнергетическим объектам с запаздыванием [13 – 15], а именно – вопросам регулирования паропроизводительности котлоагрегатов в общей паровой магистрали [16, 17].

Аналитический обзор проблемы исследования

Как было отмечено, работа ТЭС в России в первую очередь ориентирована на выработку электроэнергии в зависимости от задания регионального представителя СО и, как минимум, выполнение обязательных требований по участию в ОПРЧ. При этом в выработке электроэнергии генерирующие компании заинтересованы в первую очередь, тогда как тепловая нагрузка ТЭЦ обычно обеспечивается по остаточному принципу, как следствие обес-

печение желаемого КПД, с учетом обязательств по реализованной схеме теплоснабжения.

С точки зрения управления, задания на выработку электроэнергии со стороны СО являются предсказуемыми во времени и не вызывают проблем в реализации, тогда как отклонения в работе турбоагрегатов, возмущения со стороны парогенераторов являются «быстрыми», «труднопредсказуемыми» и «сложными» в отработке. Выделим ряд особенностей как конструкции ТЭС, так и реализованного технологического процесса, оказывающих влияние на эффективное управление данными объектами с точки зрения автоматизации.

1. Работа на угле в отличие от газа приводит к большей инерционности процесса, к сложностям в его организации и реализации (наличие дополнительных участков взаимосвязанного регулирования, каскада систем управления с инерционным поведением и отклонениями в работе вследствие изменения параметров и возмущений) [13]. Это обстоятельство еще более усугубляется тем, что в условиях рынка многие станции работают на топливе, отличающемся от проектного, что может привести к полной неработоспособности штатных классических схем регулирования [2]. Все это приводит к необходимости модернизации системы регулирования мощности, – например, на основе методов структурно-параметрической оптимизации [18].

2. Станции с общим паропроводом в отличие от блочных имеют объективные сложности в реализации задачи регулирования паропроизводительности, в том числе и при выполнении требований ОПРЧ [19, 20]. Большая гибкость с точки зрения выбора единиц работающего оборудования приводит к тому, что возмущения со стороны общего паропровода действуют на все работающие котлы и для реализации качественного управления может потребоваться, например, введение дополнительной форсировки по сигналу, эквивалентному нагрузке турбогенератора [21]. При этом необходимо отметить, что имеются определенные наработки в этой области [22], в том числе и обеспечивающие участие в НПРЧ станций с поперечными связями.

3. Барабанный котел в отличие от прямоточного менее маневрен, но более прост в решении части задач регулирования (автономность наладки подачи топлива и питания водой, регулирования температуры перегретого пара и т.п.) [23]. Между тем и здесь возникает необходимость отказа от классической схемы регулирования нагрузки и, как следствие, реализация различных вариантов, – например, с экстремальным регулятором [24].

В настоящей работе представлено решение для задачи регулирования

давления в общей паровой магистрали Благовещенской ТЭЦ. Станция имеет установленную мощность 404 МВт и 1005 Гкал/час [25], содержит в своем составе: один турбоагрегат ПТ-60-130/13 (1982 г.), два турбоагрегата Т110/120-130 (1983 г., 1985 г.), один турбоагрегат Т120/140-12,8 (2015 г.); четыре энергетических котла БКЗ-420-140-560 (1982, 1983, 1985, 1994, 2015 гг.); два водогрейных котла КВГМ-100 (1976 г.).

Технологические особенности участка регулирования

На Благовещенской ТЭЦ (БТЭЦ), как станции с общей паровой магистралью, наибольшее распространение получила схема с главным регулятором [23], представленная на рис. 1.

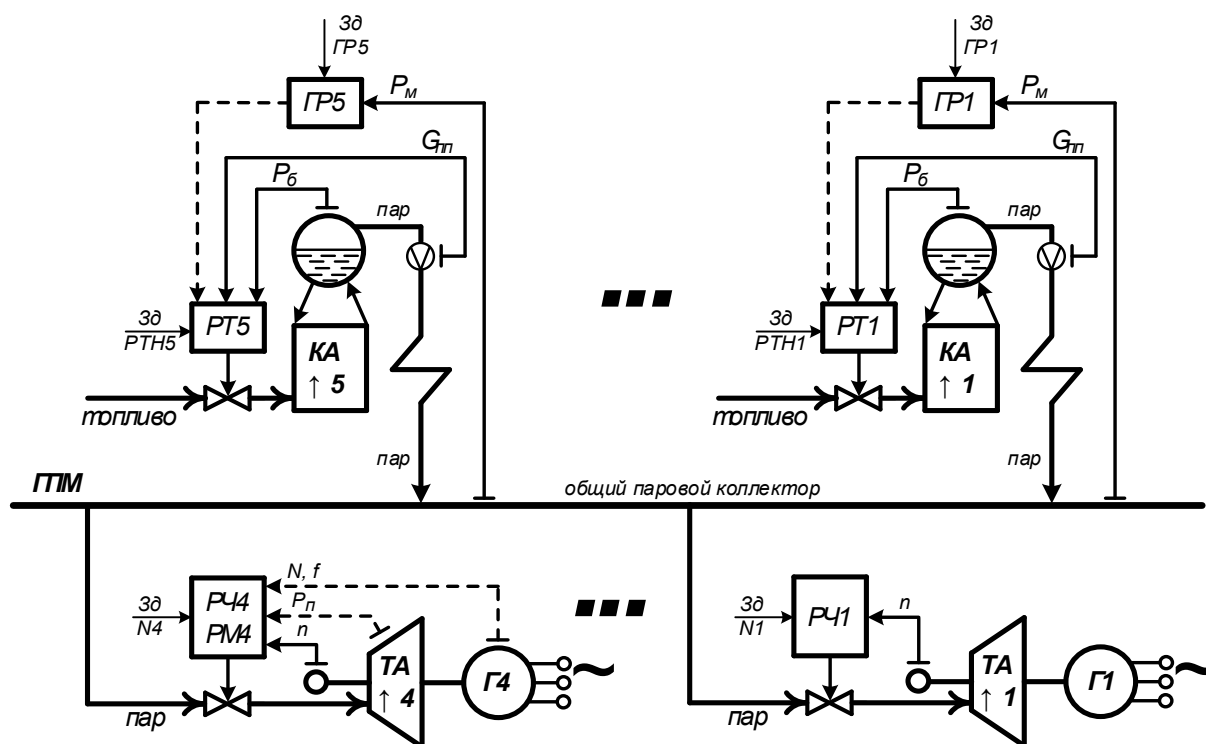


Рис. 1. Схема регулирования давления пара.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ГПМ – главная паровая магистраль; Зд – задающий сигнал; РТН – регулятор тепловой нагрузки; РТ – регулятор топлива; КА – котлоагрегат; Рб – давление пара в барабане; ГР – главный регулятор; Gпн – расход перегретого пара; Pм – давление пара в магистрали; РЧ и РМ – регуляторы частоты и мощности; N – мощность; f – частота сети; Pт – давление пара в турбине; n – обороты; ТА – турбоагрегат; Г – генератор.

Представленная схема (рис. 1) имеет ряд упрощений и особенностей, в том числе в виде решений, отличных от классической реализации.

1. Под РТ понимают связанные каскадом схемы регулирования подачи топлива, к которым относят регулятор тепловой нагрузки, загрузки мельниц

и подачи первичного воздуха, совместно с другими встроенными системами, – например, регулятором температуры аэросмеси. При этом входящий в состав регулятор тепловой нагрузки на котле один (всегда в штатном режиме находится в «авто»), тогда как мельниц (включая соответствующие контуры регулирования) – четыре; нередки случаи, когда часть мельниц находится в режиме «Руч» (тогда сигнал от регулятора тепловой нагрузки на них не поступает, а производительность задается вручную или мельница выключена вовсе) [16].

2. В классической схеме [23] *ГР* воздействует и на все *КА* одновременно (все котлы в регулирующем режиме), и на часть их (считается, что котлы с отключенной связью *ГР* переводятся в базовый режим). На БТЭЦ общий *ГР* отсутствует, вместо этого на каждом *КА* выполнена своя схема с *ГР*, но датчик давления в магистрали *Р_м* для каждого котла свой. Таким образом, штатно чаще всего один из *КА* в регулирующем режиме, остальные – в базовом. Также необходимо отметить что на БТЭЦ из-за особенностей технологической реализации парораспределение в *ГПМ* достаточно неравномерно и отклонение давления составляет до 20% на разных ее участках (в зависимости от набора работающего оборудования и нагрузки). При этом расход пара через *ТА* может достигать 520 т/час при номинальной паропроизводительности одного *КА* 420 т/час.

3. В зависимости от турбоагрегата схемы регулирования частоты и мощности (на БТЭЦ есть как гидравлические, так и более современные электрогидравлические системы) различны, в том числе и в части обратных связей, действующих в контурах регулирования. Но данный вопрос выходит за рамки настоящей работы. Здесь будем считать, что возмущения, которые оказывает каждая турбина, существенны, непредсказуемы во времени и различны.

Рассмотрим подробно классическую организацию схемы регулирования топлива на примере одного котлоагрегата БТЭЦ.

На рис. 2 показан «верхний» каскад, состоящий из *ГР* и *РТН*. В случае, если *КА* находится в базовом режиме, связь, показанная пунктиром, обрывается. На рис. 2 введены следующие обозначения: $F1(x)$ – функция, выполняющая ограничение скорости изменения и фильтрацию; Диф – дифференцирование сигнала; Σ – суммирование с масштабированием; $F2(x)$, $F5(x)$ – функции, задающие зону нечувствительности; РАН – регулирование аналоговое (ПИД регулятор с настраиваемыми параметрами); ПЕР – блок переключения (сигналом является перевод соответствующего контура в «авто» – на схеме обозначен как «Авт ...»); УП – соответствующий показывающий

прибор; $F3(x)$ – функция, задающая соответствующие ограничения и фильтрацию сигнала, а также преобразующие показания датчика расхода; $F4(x)$ – функция фильтрации.

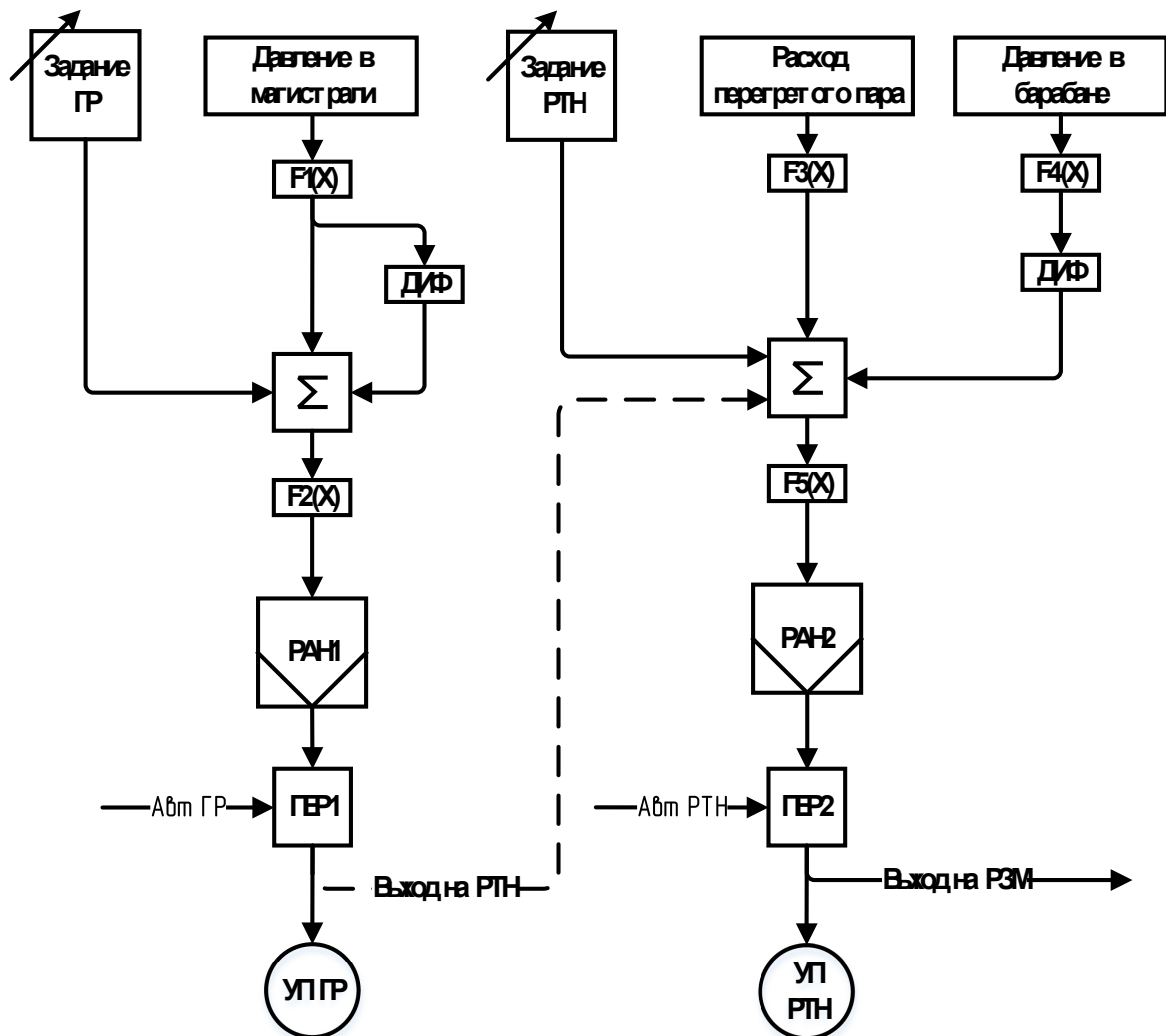


Рис. 2. Схема верхнего каскада GR и PTH.

На рис. 3 показан один из четырех контуров подчиненного регулирования (для каждой из мельниц А, Б, В, Г он аналогичен) мельницы молотковой тангенциальной (ММТ): так называемый РЗМ – регулятор нагрузки мельницы, регулирующий обороты $N_{псу}$ питателя сырого угля (ПСУ), и РПВ – регулятор первичного воздуха, управляющего открытием направляющего аппарата вентилятора горячего дутья (ВГД).

На рис. 3 в дополнение к ранее указанным обозначениям введены: $F6(x)$ – показан обобщенный функционал, реализующий как зону нечувствительности, так и изменения параметров PИ (коэффициентов регулятора) в зависимости от режима работы; КонцБ – запрет на отработку в сторону «больше» регулятора при достижении РПВ крайнего положения; РучРЗМ – сигнал, позволяющий напрямую (переведя РЗМ в положение «Руч») задавать обороты ПСУ сигналом задания; $F7(x)$ – преобразование, выполняющее

смещение сигнала с ограничением его скорости и фильтрации; $F8(x)$, $F9(x)$, $F10(x)$ – функции фильтрации, в том числе с обнаружением выхода сигнала за границу уставки; $F11(x)$ – зона нечувствительности; РИМ – регулятор импульсный (реализующий ПДД2 закон с ШИМ для исполнительных механизмов постоянной скорости МЭО).

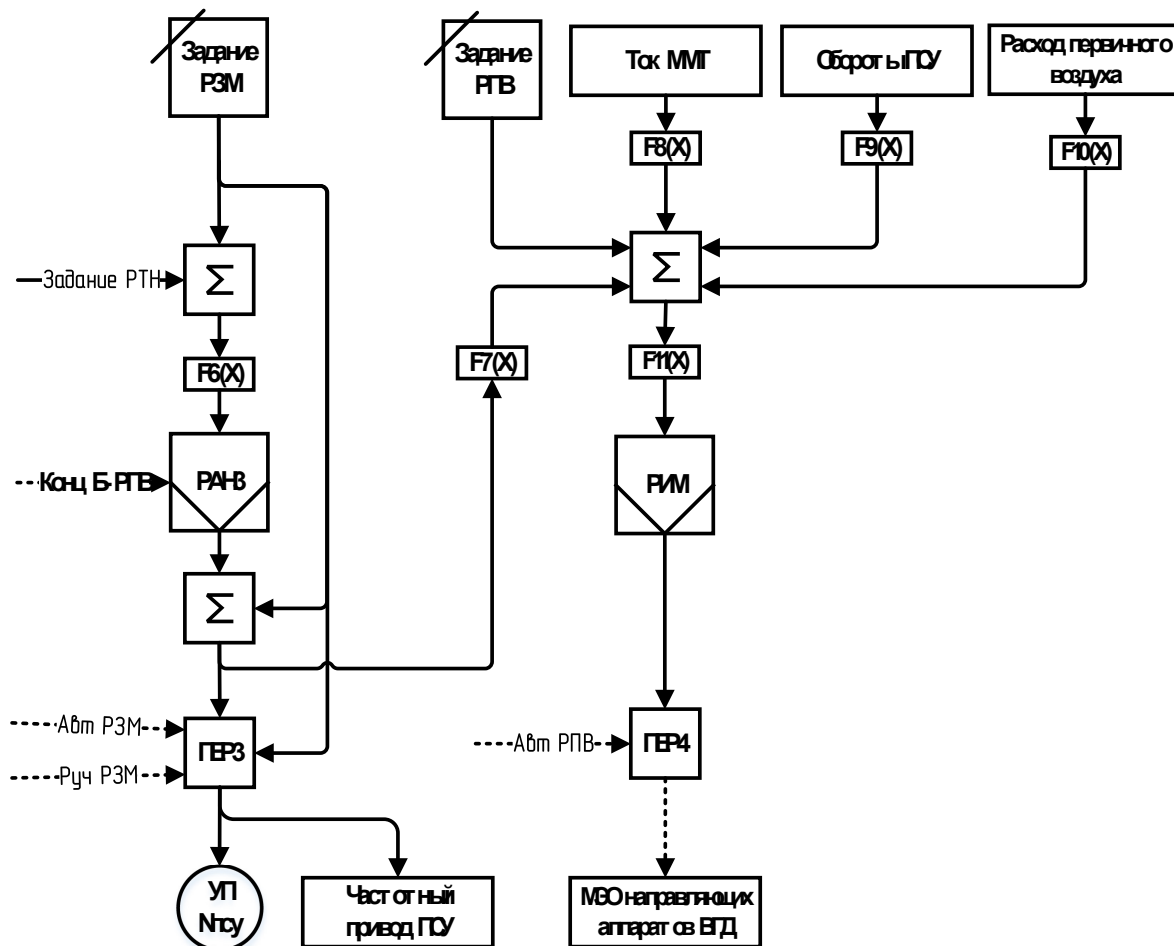


Рис. 3. Схема подчиненного контура РЗМ и РПВ.

Структурные и теоретические особенности синтеза систем управления тепловой нагрузкой котлов достаточно полно рассмотрены в [2]. Здесь же отметим ряд факторов, которые с точки зрения авторов ограничивают применение на практике тех или иных подходов к оптимальной настройке рассматриваемой системы регулирования:

- а) нестабильность параметров топлива, в том числе его существенное отличие от проектных марок;
- б) некорректно организованный (настроенный) режим подачи общего, первичного и вторичного воздуха, сгорания топлива; в целом отсутствие качественной режимной наладки;
- в) внесение существенных изменений как в отдельные конструктивные элементы котла, так и в исполнительную, регулирующую арматуру, системы

контроля – без необходимого объема ПИР, СМР и ПНР;

г) отсутствие качественных, своевременных, полномасштабных капитальных и средних ремонтов, технического обслуживания; экстремальная эксплуатация оборудования «на износ».

Таким образом, при настройке систем регулирования вместо оптимального подхода обеспечивают «грубую реализацию» направленную на «компенсацию» технологических проблем. В итоге нередко переводом пылесистем в ручной режим и перераспределением их нагрузки обеспечивают коррекцию расположения факела. Такой «полуавтоматический» режим характерен для большого числа систем регулирования, в том числе и когда проблемы газоздушного тракта не обеспечивают должный перегрев пара, не говоря уже о выполнении экологических требований.

Ввиду того, что для большинства станций решить указанные выше проблемы не представляется возможным, в настоящей работе предлагается за счет принципов адаптации обеспечить реализацию «верхнего» контура регулирования. Это позволит обеспечить:

а) работоспособность для широкого диапазона нагрузок в условиях изменений параметров топлива, наличия возмущений, быстрых отклонений регулируемой переменной;

б) инвариантность к изменению работы подчиненных систем регулирования (парируется случай изменения как параметров объекта, так и его структуры);

в) отсутствие необходимости перенастройки в длительном режиме эксплуатации за счет самонастройки системы.

Математическое описание объекта

Для получения математического описания объекта воспользуемся пассивным экспериментом на БТЭЦ [3]. Полученное таким образом решение автоматически учитывает проблемы «практической эксплуатации», при условии обработки представительного объема данных [13 – 17].

В качестве объекта исследования рассмотрим КА ст№1 БТЭЦ. Обработку экспериментальных данных проведем следующим образом [16]:

а) рассмотрим случаи, когда ГР находился в положении «Руч» (пунктирная линия связи на рис. 2 отсутствовала);

б) подачей на вход ступенчатого отклонения для объекта будем считать достаточно резкое изменение задания РТН – до 5%, сохраняющее свое значение до момента выхода котла на установившийся режим;

в) рассмотрим случаи, когда на протяжении не менее 30 минут был

стационарный режим в работе котла до подачи отклонения;

г) особое внимание уделим вариантам, когда РЗМ и РПВ разных мельниц находились как в «Авт», так и «Руч».

Математическое описание объекта будем рассматривать в виде:

$$W(s) = \frac{k(b_2s^2 + b_1s + 1)}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + 1} e^{-\lambda s}, \quad (1)$$

где k – коэффициент усиления; b_2 и b_1 – параметры числителя; a_3 , a_2 и a_1 – параметры знаменателя; λ – значение запаздывания.

Будем при этом считать, что передаточная функция (1) может изменяться, т.е. может изменяться ее порядок n и относительный порядок $\rho = n - m$, где n – размерность знаменателя (1), m – размерность числителя (1).

В результате обработки данных [26] с помощью пакета Matlab (приложение System Identification Tool), получим наборы коэффициентов передаточной функции (1), которые сведем в табл.1 – 4, где под «порядком» понимается относительный порядок модели; $Hб$ – уровень в барабане; σ – величина отклонения модели, вычисленная по методу наименьших квадратов.

Таблица 1

КА-1: $G_{пн}$ (т/ч) = 355÷320; P_m (МПа) = 126,75÷125,4; $Hб$ (мм) = 2,5÷2,5; $Pб$ (МПа) = 136,4÷133; РПВ/РЗМ: Авт = А, Г; Руч = Б; Нет данных = В; В работе: КА-1, КА-2; Остановлены: КА-3, КА-4, КА-5;									
№	Порядок	k	b_2	b_1	a_3	a_2	a_1	λ	σ
1	0/1	0,4441	0	0	0	0	683	34	0,1260
2	0/2	0,4441	0	0	0	33400	715	34	0,1270
3	0/3	0,4441	0	0	2993000	107500	714	34	0,1300
4	1/2	0,4441	0	131	0	98040	779	34	0,1260
5	1/3	0,4441	0	49	6031000	152200	794	34	0,1310
6	2/3	0,4441	8059	174	16170000	133400	820	34	0,1260

Таблица 2

КА-1: $G_{пн}$ (т/ч) = 320÷330; P_m (МПа) = 128,0÷129,6; $Hб$ (мм) = 1,5÷1,5; $Pб$ (МПа) = 136,0÷138; РПВ/РЗМ: Авт = А; Руч = Б,В; Нет данных = Г; В работе: КА-1, КА-4; Остановлены: КА-2, КА-3, КА-5;									
№	Порядок	k	b_2	b_1	a_3	a_2	a_1	λ	σ
1	0/1	0,7273	0	0	0	0	493	23	0,2670
2	0/2	0,7273	0	0	0	348200	691	23	0,1990
3	0/3	0,7273	0	0	3200	455	432	23	0,2790
4	1/2	0,7273	0	35	0	376600	687	23	0,2010
5	1/3	0,7273	0	16	3200	455	432	23	0,2820
6	2/3	0,7273	4411	89	68350000	319500	958	23	0,1970

Таблица 3

КА-1: $G_{пл}$ (т/ч) = 320÷330; P_m (МПа) = 124,0÷125,5; H_b (мм) = 2,0÷2,0; P_b (МПа) = 132,3÷134; РПВ/РЗМ: Авт = А,Г; Руч = Б; Нет данных = В; В работе: КА-1, КА-4; Остановлены: КА-2, КА-3, КА-5;									
№	Порядок	k	b_2	b_1	a_3	a_2	a_1	λ	σ
1	0/1	0,1256	0	0	0	0	291	5	0,0215
2	0/2	0,1256	0	0	0	24649	354	5	0,0254
3	0/3	0,1256	0	0	2575000	49380	378	5	0,0283
4	1/2	0,1256	0	404	0	210600	678	5	0,0240
5	1/3	0,1256	0	270	4794000	93990	694	5	0,0258
6	2/3	0,1256	5773	144	2867000	96640	681	5	0,0293

Таблица 4

КА-1: $G_{пл}$ (т/ч) = 328,7÷373,2; P_m (МПа) = 125÷129,3; H_b (мм) = 2,3÷2,3; P_b (МПа) = 133,0÷139,5; РПВ/РЗМ: Авт = А,Г; Руч = Б,В; Нет данных = нет; В работе: КА-1, КА-4; Остановлены: КА-2, КА-3, КА-5;									
№	Порядок	k	b_2	b_1	a_3	a_2	a_1	λ	σ
1	0/1	0,6626	0	0	0	0	214	28	0,0782
2	0/2	0,6626	0	0	0	13960	222	28	0,0728
3	0/3	0,6626	0	0	136700	14910	220	28	0,0719
4	1/2	0,6626	0	428	0	122500	472	28	0,0438
5	1/3	0,6626	0	776	1528000	190400	738	28	0,0436
6	2/3	0,6626	2204950	8598	711700000	3131000	8406	28	0,0475

Таким образом, из анализа таблиц данных следует, что объект является структурно-параметрический неопределенным с изменяющейся динамикой.

Алгоритмы управления и имитационное исследование системы

Представим описание исследуемого объекта управления (1) в пространстве состояний:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t - \lambda), \quad y(t) = L^T x(t), \quad (2)$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния; A – произвольная матрица состояния в форме Фробениуса размерности $n \times n$; $B = [0, \dots, 0, 1]^T$ – вектор размерности n ; $u(t) \in R$ – управляющее воздействие; $\lambda = const > 0$ – известное постоянное запаздывание; L – постоянный вектор размерности n ; $y(t) \in R$ – измеряемый выход объекта.

В форме вход-выход объект (2) может быть записан

$$a(p)y(t) = L(p)u(t - \lambda), \quad (3)$$

где $p = d/dt$; $a(p)$ – любой нормированный квазиполином; $\deg a(p) = n$; $L(p)$ – гурвицев нормированный полином с положительным старшим коэффициентом, $\deg L(p) = m$.

Следуя вышеописанному, функционирование объекта (1) происходит

при следующих условиях:

1) значения $\max(n)$ и $\min(m)$ – известны, причем максимум $\rho_{\max} = \max(n) - \min(m) = \max(n)$, когда $\min(m) = 0$;

2) коэффициенты матрицы A и векторов B, L объекта (2) являются неизвестными числами, зависящими от набора неизвестных параметров ξ ;

3) напрямую в объекте (1) измеряются только выход $y(t)$ и запаздывающее управление $u(t - \lambda)$.

Учитывая, что максимальный относительный порядок объекта (2) больше единицы, в основной контур системы управления последовательно к выходу объекта (2) подключают выходной фильтр-корректор

$$y_{out}(s) = W_{out}(s)y(s) = \left(\frac{Ts + 1}{T_*s + 1} \right)^{\rho_{\max} - 1} y(s) = \left(\frac{Ts + 1}{T_*s + 1} \right)^2 y(s), \quad (4)$$

где s – переменная Лапласа; $y_{out}(t)$ – выход фильтра; $T, T_* = const > 0$ – известные постоянные; T_* – достаточно мала [27 – 29].

Следуя работам [27, 30], требуемая динамика выхода основного контура формируется с помощью задающего фильтр-корректора:

$$r_{in}(s) = W_{in}(s)r(s) = \left(\frac{Ts + 1}{T_*s + 1} \right)^{\rho_{\max} - 1} r(s) = \left(\frac{Ts + 1}{T_*s + 1} \right)^2 r(s), \quad (5)$$

где $r(t)$ – скалярное задающее воздействие; $r_{in}(t)$ – выход фильтр-корректора.

Для задания желаемой динамики объекта управления можно воспользоваться неявной эталонной моделью [27, 28, 30]

$$y_*(s) = \frac{1}{\chi_*^{-1}s + 1} r_{in}(s) = \frac{\chi_*}{s + \chi_*} r_{in}(s), \quad (6)$$

где $y_*(t)$ – скалярный выход неявного эталона, который при $\chi_* \gg 1$ удовлетворяет соотношениям $y_*(t) \cong r_{in}(t)$.

Для компенсации запаздывания по управлению применяется специальное устройство – упредитель-компенсатор [31 – 33]

$$y_K(t) = \frac{\chi_*}{p + \chi_*} (u(t) - u(t - \lambda)), \quad (7)$$

где $y_K(t)$ – выход упредитель-компенсатора. Закон управления, синтезированный аналогично [34], имеет вид:

$$u(t) = r_{in}(t) + \gamma_1 \text{sat}(y_{out}(t)) \int_0^t \text{sat}(y_{out}(\theta)) v(\theta) d\theta + \gamma_2 (\text{sat}(y_{out}(t)))^2 v(t) + \gamma_3 u(t - \lambda) \int_0^t u(\theta - \lambda) v(\theta) d\theta + \gamma_4 \int_0^t v(\theta) d\theta + \gamma_5 v(t), \quad (8)$$

где $v(t) = r_{in}(t) - \text{sat}(y_{out}(t)) - y_K(t)$; где $\gamma_i = const > 0, i = 1, \dots, 5$ – парамет-

ры закона управления, значения которых подбираются в процессе имитационного моделирования.

Исследование системы (2), (4) – (8) с параметрами из табл. 3 рассматривалось при $r(t) = 0.8 - 0.3(1 - e^{-0.1(t-25000)}) + 0.5(1 - e^{-0.2(t-50000)})$. Поскольку максимальная размерность знаменателя объекта (1) $n = 3$, а минимальная размерность числителя $m = 0$, поэтому при $\rho_{max} = 3$, фильтр-корректоры получили вид (4), (5) и рассматривались с параметрами: $T = 10$, $T^* = 0.1$.

В упредитель-компенсаторе (7) было выбрано значение $\chi^* = 1000$.

В процессе имитационного моделирования проводилась серия вычислительных экспериментов, в ходе которых были найдены параметры закона управления (8), обеспечивающие приемлемое качество функционирования объекта (2) с переменным относительным порядком: $\gamma_1 = 10000$, $\gamma_2 = 20000$, $\gamma_3 = 10$, $\gamma_4 = 1000$, $\gamma_5 = 1000$.

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 1 – 3.

На рис. 4 изображен переходный процесс в системе с объектом

$$W(s) = \frac{0.1256}{24649s^2 + 354s + 1} e^{-5s}. \quad (9)$$

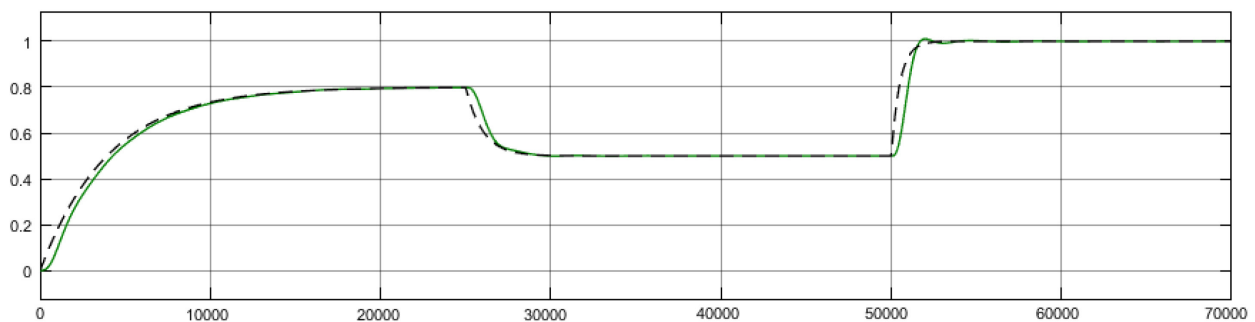


Рис 4. Динамические процессы в исследуемой системе: сплошная линия – выход объекта управления (9), пунктирная линия – задающее воздействие $r(t)$.

На рис. 5 представлен динамический процесс для объекта

$$W(s) = \frac{0.1256}{2575000s^3 + 49380s^2 + 278s + 1} e^{-5s}. \quad (10)$$

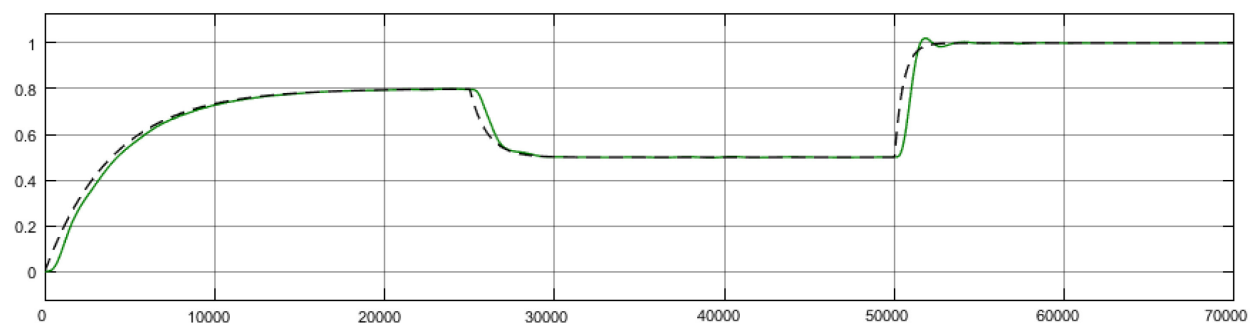


Рис 5. Переходные процессы в исследуемой системе: сплошная линия – выход объекта управления (10), пунктирная линия – задающее воздействие $r(t)$.

Рис. 6 иллюстрирует изменение выхода в объекте (1) со следующими

параметрами:

$$W(s) = \frac{0.1256(270s + 1)}{4794000s^3 + 93990s^2 + 694s + 1} e^{-5s}. \quad (11)$$

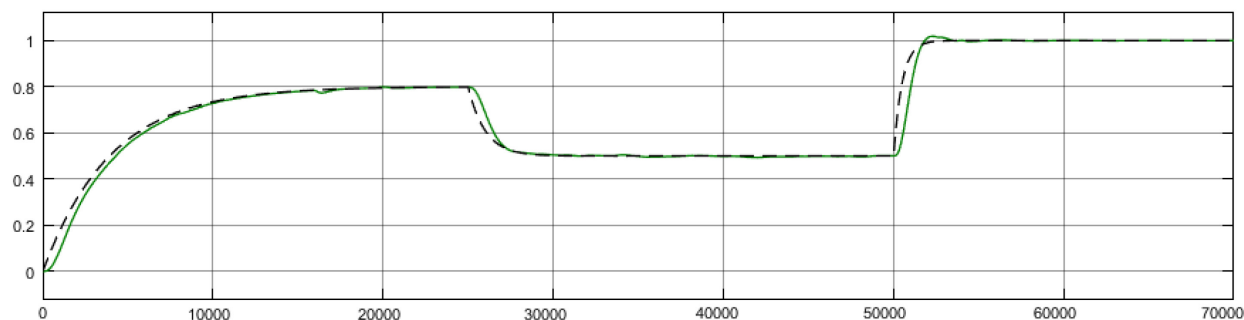


Рис 6. Переходные процессы в исследуемой системе: сплошная линия – выход объекта управления (11), пунктирная линия – задающее воздействие $r(t)$.

В процессе моделирования объектов (9) – (11) значение ошибок в установившихся режимах не превышало 0.6%, что говорит о хорошем качестве функционирования полученной системы управления.

Заключение

Представленный в данной работе подход, связанный с построением системы управления для объекта теплоэнергетики с запаздыванием, функционирующим в условиях структурно-параметрической неопределенности с переменным относительным порядком показал, что за счет модификации схемы фильтр-корректоров и применения комбинированных алгоритмов управления можно обеспечить достаточно эффективное регулирование динамики в широком диапазоне работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Basu Swapan, Debnath Ajay Kumar.* Power Plant Instrumentation and Control Handbook. A Guide to Thermal Power Plants. Second Edition. – Academic Press, Elsevier, 2019.
2. *Тверской Ю.С.* Автоматизация пылеугольных котлов электростанций. Монография: СПб.: Издательство «Лань», 2022.
3. Российский статистический ежегодник. 2021: Стат.сб./Росстат. – P76. – М., 2021.
4. *Ozawa Mamoru, Asano Hitoshi.* Advances in Power Boilers. – Elsevier, 2021.
5. *Wang Congyu, Song Jiwei, Zheng Wei, Liu Zhaozhao, Lin Chengkun.* Analysis of economy, energy efficiency, environment: A case study of the CHP system with both civil and industrial heat users // Case Studies in Thermal Engineering. – Vol. 30. – 2022. – 101768. DOI: 10.1016/j.csite.2022.101768.
6. *Cao Lihua, Wang Zhanzhou, Pan Tongyang, Dong Enfu, Hu Pengfei, Liu Miao, Ma Tingshan.* Analysis on wind power accommodation ability and coal consumption of heat-power decoupling technologies for CHP units // Energy. – Vol. 231. – 2021. – 120833. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120833.
7. *Jiang T., Min Y., Zhou G., Chen L., Chen Q. and Xu F.* Dispatch model for integrated heat

- and power systems considering internal composition of CHP plants // Journal of Power and Energy Systems, 2021. – Vol. 7, №2. – P. 396-407. DOI: 10.17775/CSEE JPES.2020.00560.
8. Чернавский С.Я., Хачатурян Н.Р. Экономическое поведение потребителей в условиях современных вызовов в пореформенный период развития электроэнергетики России // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2020. – Т.1, № 11 (107). – С. 33-45.
 9. Технические требования к генерирующему оборудованию участников оптового рынка. – М.: АО «СО ЕЭС», 28.12.2021.
 10. Биленко В.А., Тузов И.В., Никольский Д.Ю. Усовершенствование структурных схем автоматических систем регулирования крупных паросиловых энергоблоков для обеспечения выполнения ими требований ОПРЧ и НПРЧ // Теплоэнергетика. – 2022. – №3. – С. 20-30.
 11. Бинько Г.Ф., Миляев Р.Г, Шаров Ю.В. и др. Внедрение системы автоматического регулирования частоты и мощности Прегольской ТЭЦ // Электрические станции. – 2020. – №10 (1071). – С.17-23.
 12. Бинько Г.Ф., Миляев Р.Г, Аюев Б.И. и др. Совершенствование систем автоматического регулирования ГТЭ-160 для обеспечения их надежной работы в ЕЭС России // Электрические станции. – 2020. – №9 (1070). – С.20-28.
 13. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А. Адаптивное и робастное управление в теплоэнергетике. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2009.
 14. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Семичевская Н.П., Чепак Л.В., Шеленок Е.А. Управление техническими системами в условиях неопределенности. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014.
 15. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Шеленок Е.А. Управление и автоматизация сложных систем в условиях неопределенности. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2015. – 247 с.
 16. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А. Автоматизированная система регулирования расхода топлива ТЭЦ // Информатика и системы управления. – 2011. – №2(28) – С. 157-168.
 17. Косицын В.Ю., Рыбалев А.Н., Теличенко Д.А. Система управления тепловой нагрузкой котла // Теплоэнергетика. – 2013. – №2 – С. 54-60.
 18. Артеменко К.И. Структурно-параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в широком изменении нагрузок // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2019. – Т.62, №5. – С.469-481. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-5-469-481.
 19. Zhalnin D.A. To the task of controlling a group of objects on the basis of information technologies // Siberian Journal of Science and Technology. – 2019. – Vol. 20, №2. – P. 144-152. DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-144-152.
 20. Жалнин Д.А. Управление группой котлов с поперечными связями // Решетневские чтения. Материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. – 2019. – С. 244-245.
 21. Andriushin A.V., Zverkov V.P., Kuzishchin V.F., Ryzhkov O.S., Sabanin V.R. Imitative modeling automatic system control of steam pressure in the main steam collector with the influence on the main servomotor steam turbine // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – 012295. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012295.
 22. Зорченко Н.В., Чаплин А.Г., Павлова М.Ф., Паришутин М.Е. Участие ТЭС в регулировании частоты и мощности // Теплоэнергетика. – 2021. – №6. – С.94-102.
 23. Плетнев Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. – Изд. 4-е, стереотип. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007.

24. Сабанин В.Р., Кормилицын В.И., Костык В.И., Смирнов Н.И., Коротеев А.В., Репин А.И. Регулирование нагрузки и обеспечение экономичности паровых котлов с экстремальным регулятором // Теплоэнергетика. – 2014. – № 12. – С. 63-63.
25. Благовещенская ТЭЦ. Акционерное общество «Дальневосточная генерирующая компания» (входит в группу «РусГидро») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dvgk.ru/page/2767>.
26. Теличенко Д.А. Математические модели для одного класса сложных инерционных объектов с изменяющейся динамикой и запаздыванием / Д.А. Теличенко, Д.И. Никольский // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». – 2016. – Т. 7, №3. – С.142-151. – Режим доступа: http://ejournal/articles-2016/TGU_7_172.pdf.
27. Еремин Е.Л., Никифорова Л.В., Шеленок Е.А. Система комбинированного нелинейного управления структурно-параметрически неопределенным неаффинным объектом с запаздыванием по состоянию и запаздыванием нейтрального типа // Датчики и системы. – 2021. – № 1(254). – С. 50-58.
28. Еремин Е. Л., Никифорова Л. В., Шеленок Е. А. Комбинированный регулятор системы с неявным эталоном для управления по выходу структурно неопределенным неаффинным объектом с неизвестным запаздыванием по состоянию // Информатика и системы управления. – 2020. – № 4(66). – С. 118-128.
29. Eremin E. L., Nikiforova L. V., Shelenok E. A. Combined Nonlinear Control Algorithm for Structural Undefined Non-Affine Input Delayed Plant // Proceedings – 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021. – P. 6-11.
30. Еремин Е. Л., Никифорова Л. В., Шеленок Е. А. Комбинированная нелинейная система управления с неявным эталоном для априорно неопределенного неаффинного двухканального объекта с запаздываниями по выходу // Информатика и системы управления. – 2020. – № 1(63). – С. 95-108.
31. Eremin E. L., Chepak L. V. Combined controller for a nonaffine plant with delay in control // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2019. – Vol. 55, № 6. – P. 542-549.
32. Eremin E. L., Nikiforova L. V., Shelenok E. A. Combined Control System for Structural and Parametric Uncertain Non-Affine Plants with Delay in Control // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. – 9271642.
33. Патент № 2449337 С1 Российская Федерация, МПК G05B 17/00. Еремин Е.Л., Чепак Л.В. Следящая система управления для априорно-неопределенных объектов с запаздыванием по управлению: опубл. 27.04.2012.
34. Еремин Е. Л., Цыкунов А. М. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. — Бишкек: Илим, 1992.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.Л. Ереминым.

E-mail:

Никифорова Лариса Владимировна – chepak@inbox.ru;

Теличенко Денис Алексеевич – telichenko@yandex.ru.