

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Э.Э.ГУРЕВИЧ

ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПИТАНИЯ
ПАРОГЕНЕРАТОРОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ,
РАБОТАЮЩИХ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ РЕЖИМОВ

Специальность № 05.198
(Автоматизация производственных процессов)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

М и н с к 1 9 7 1

Работа выполнена в Белорусском филиале Государственного научно-исследовательского энергетического института имени Г.М.Кржижановского (гор. Минск).

Научный руководитель:

доктор технических наук Г.И.ХУТСКИЙ

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН БССР,
доктор технических наук, профессор А.Г.ШАШКОВ

кандидат технических наук И.Г.ПЛИСАН

Ведущее предприятие:

Главное производственное управление энергетики и электрификации БССР "БЕЛГЛАВЭНЕРГО"

Автореферат разослан "20" сентября 1971 г.

Защита диссертации состоится "3" декабря 1971 г.

на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Дата защиты будет дополнительно объявлена в Газете "Вечерний Минск".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Просим Вас принять участие в обсуждении диссертации или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, по адресу: гор. Минск, 27, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт, Ученому секретарю Совета по энергетическим специальностям.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук

Л.ЧЕРВИНСКИЙ

В настоящее время наметилась устойчивая тенденция к уплотнению суточных графиков нагрузки энергетических систем. Уже в ближайшие годы практически все блочные паротурбинные установки европейской части СССР будут участвовать в покрытии переменных нагрузок. Это требует повышения маневренности оборудования, останова части крупных блоков на выходные и праздничные дни, а в перспективе - и на ночь.

Поэтому освоение работы энергетического оборудования большой мощности в широком диапазоне нагрузок и в переходных режимах (пуск, останов, резкие изменения нагрузки) составляет одну из наиболее актуальных проблем развития энергетики. Ее решение предполагает автоматизацию пусковых операций и внедрение всережимных систем автоматического управления технологическими процессами.

Реферлируемая диссертация посвящена созданию всережимной системы автоматического регулирования (САР) питания парогенераторов с естественной циркуляцией (ПГ). Как известно, поддержание уровня воды в барабане ПГ в допустимых пределах является важнейшим условием безопасной работы энергоустановки. Однако штатные трехимпульсные САР питания не приспособлены для использования в переходных режимах и при низких нагрузках, а также в некоторых других случаях. Отдельные попытки разработать всережимную САР питания, предпринимавшиеся как в СССР, так и за рубежом, еще не завершились созданием системы, удовлетворяющей требованиям эксплуатации.

Цель диссертационной работы состояла в разработке простой и надежной САР питания для парогенераторов, работающих в широком диапазоне режимов. Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

I. Исследовать влияние режима работы ПГ на динамические свойства зоны регулирования уровня в барабане.

2. На основе полученных данных исследовать поведение САР питания в широком диапазоне режимов парогенератора.

3. На базе этих исследований усовершенствовать трехимпульсную схему САР питания, приспособив ее для работы в широком диапазоне режимов, включая пуски и остановки ПГ и блока.

4. Обеспечить удовлетворительную работу измерителей уровня воды в барабане ПГ во всех режимах.

5. Разработать новые конструкции регулирующих клапанов для применения в схемах пусковых и воорезимных САР питания.

Чтобы найти технические решения, приемлемые для широкого использования, автором помимо экспериментальных и аналитических исследований выполнен в содружестве с работниками Белорусской энергосистемы большой объем экспериментально-конструкторских и пуско-наладочных работ. В результате разработаны и испытаны усовершенствованные конструкции регулирующих клапанов и заборных устройств уровнемеров и усовершенствованная схема САР питания, новизна которых защищена семью авторскими свидетельствами на изобретения. Некоторые разработки уже получили широкое распространение на электростанциях СССР.

Диссертация включает предисловие, введение, пять глав, приложения и список литературы. В соответствии с характером проделанной работы она разделена на две части.

Часть первая (главы I и 2) содержит описание основных экспериментальных и аналитических исследований регулирования питания в широком диапазоне режимов.

В первой главе приведены результаты экспериментального исследования динамических свойств зоны регулирования уровня. В начале главы дан краткий анализ литературы по данному вопросу.

Изучению поведения уровня в нестационарных режимах на основе традиционного подхода к парогенератору как к объекту с сосредоточенными параметрами в послевоенный период были посвящены работы Б.И.Алешина, В.Я.Бейраха, И.Н.Вознесенского, И.В.Демьянчука, П.С.Денисенко, Ю.Г.Корилова, В.Д.Пивеня, В.И.Сенькина, Е.П.Фельдмана, М.Ш.Шифрина, Л.С.Шумской и других отечественных и зарубежных авторов. Во всех работах ПГ рассматривается как детерминированный объект, динамические

параметры которого строго постоянны при неизменных внешних условиях (нагрузка, подвод топлива и воздуха, температура питательной воды и т.п.). Почти все авторы исследовали только процессы в циркуляционном контуре ПГ, без учета влияния водяного экономайзера, так как основное внимание уделялось динамике уровня при возмущении паровой нагрузкой.

Для создания всережимной САР питания необходимо знать и реакцию объекта по каналу регулирования уровня (при возмущении расходом питательной воды). Согласно расчетам, выполненным по уравнениям динамики циркуляционного контура, она должна быть близка к реакции идеального интегрирующего звена (без запаздывания). Однако этот вывод не согласуется с экспериментом: единичные кривые разгона, опубликованные в ряде работ, содержат значительное запаздывание. Е.П.Фельдман впервые высказал предположение, что запаздывание обусловлено, главным образом, аккумуляцией воды в кипящем экономайзере.

В последние годы предложены более подробные детерминированные математические модели ПГ (работы В.М.Рудинского и сотрудииков, П.Профоса, М.Шунка и др.), по которым можно было бы изучать влияние на поведение уровня различных режимных и конструктивных факторов. Однако сами эти модели еще не прошли серьезную экспериментальную проверку.

Таким образом, еще нет вполне апробированных математических моделей ПГ по каналу регулирования уровня, которые могли бы служить основой для разработки всережимной САР питания, а имеющихся экспериментальных данных недостаточно для этой цели. Чтобы в какой-то мере восполнить этот пробел, было выполнено экспериментальное исследование динамических свойств зоны регулирования уровня в барабане ПГ высокого давления типа ТП-230 Минской ТЭЦ-3.*)

В ходе экспериментов по обычной методике определяли временные характеристики ПГ по каналу: расход питательной воды - уровень в барабане для различных режимов. При выборе методики активного эксперимента по следующим причинам было отдано предпочтение скачкообразным возмущениям перед случайными и

*) Эксперименты проводились совместно с инженером В.И.ФРЕНКЕЛЕМ (Минская ТЭЦ-3).

гармоническими. Во-первых, поскольку САР питания выполняет защитные функции, основными расчетными возмущениями для нее надо признать скачкообразные. Во-вторых, благодаря небольшой длительности каждого опыта кривые разгона можно снимать во время переходных режимов ПГ. В-третьих, статистическая обработка большого числа кривых разгона позволяет оценить вероятностные свойства объекта исследования.

Основные параметры - уровень, давление в барабане, расходы воды и пара - регистрировались на ленте многоточечного потенциометра ЭПП-09 с помощью приставок ВТИ-ОРГРЭС типа ПР-И. Учет инерционности измерителей выполнен по данным Г.М. Ивановой и В.П. Преображенского.

Для обработки результатов опытов использована идеализированная динамическая модель зоны регулирования уровня, в качестве которой на основании анализа уравнений циркуляционного контура и экспериментальных временных характеристик принято последовательное соединение звена чистого запаздывания с интегрирующим звеном. По диаграммам опытов определялись параметры этих звеньев - запаздывание τ и коэффициент усиления K_1 , величина возмущения $\Delta G'$, а также некоторые другие величины. Затем все данные обрабатывались статистически.

Всего проведено 514 опытов (29 серий), из которых 478 (25 серий) выполнены при работе ПГ на общую паровую магистраль, а остальные - при работе на растопочную РОУ. Установлено, что парогенератор по каналу регулирования уровня при вероятностных возмущениях целесообразно рассматривать как вероятностный объект с постоянной структурой и переменными параметрами. Динамические параметры τ и K_1 меняются в широких пределах при неизменных условиях работы ПГ. Их абсолютные отклонения одного порядка со средними значениями, а в отдельных случаях даже превосходят последние. Средневзвешенные по всем опытам относительные средние квадратичные отклонения τ и K_1 составили соответственно 0,37 и 0,28. Вместе с тем математические ожидания и средние квадратичные отклонения этих параметров достаточно стабильны во времени.

Отсюда следует, что при анализе САР питания необходимо учитывать случайные флуктуации динамических параметров объекта, а экспериментальную проверку даже детерминированной мате-

матической модели зоны регулирования уровня можно выполнить только с привлечением статистических методов.

Полученные данные позволили оценить закон распределения параметров τ и K_1 . Установлено, что оба эмпирические распределения достоверно отличаются от нормального (при сравнении всех данных уровень значимости принят 0,001) и удовлетворительно описываются известным распределением Шарлье (при значении асимметрии $A = 0,55$ и эксцесса $E = 0$). Анализ экспериментальных данных не выявил сколь-нибудь заметной корреляционной связи между величинами τ , K_1 и $\Delta G'$.

Знание распределения τ дало возможность объективно оценить величину запаздывания при различных режимах работы парогенератора ТП-230 и установить, что она зависит от знака возмущения, вида сжигаемого топлива, нагрузки ПГ и температуры питательной воды. При положительных возмущениях среднее значение запаздывания приблизительно на 15 % больше, чем при отрицательных. Оно увеличивается в среднем на 10 % при переходе с газообразного топлива на АШ. Влияние нагрузки и температуры питательной воды на величину запаздывания в рабочем диапазоне режимов может быть учтено следующей эмпирической формулой:

$$\frac{\Delta \bar{\tau}}{\bar{\tau}_0} \cong 0,6 \left(- \frac{\Delta G}{G_0} + \frac{\Delta t_{\text{пв}}}{t_{0\text{пв}}} \right), \quad (I)$$

где $\bar{\tau}_0$, G_0 , $t_{0\text{пв}}$ - математическое ожидание запаздывания, нагрузка и температура питательной воды в исходном режиме; $\Delta \bar{\tau}$, ΔG , $\Delta t_{0\text{пв}}$ - приращения соответствующих величин.

Анализ полученных данных подтверждает соображения Е.П. Фельдмана относительно природы запаздывания.

Для создания всережимной САР питания особое значение имеет экспериментально установленный факт значительного ухудшения динамических свойств зоны регулирования уровня при пусках и остановках ПГ. При работе парогенератора на растопочную РОУ изменялся вид временной характеристики, а величина эквивалентного запаздывания была в 3-4 раза больше, чем запаздывание в обычных эксплуатационных условиях.

Во второй главе изложены результаты аналитического исследования трехимпульсной САР питания при различ-

ных нагрузках и давлениях, выполненного применительно к парогенераторам типов ПК-10 [15] и ТП-230. Исходным материалом для него послужили результаты экспериментального исследования динамических свойств зоны регулирования уровня (гл. I) и уравнения динамики циркуляционного контура (работы Л.С.Шумской, И.В.Демьянчука, Г.А.Джигита и др.).

Передаточные функции элементов получены для линейной модели САР при введении ряда общепринятых допущений. При их выводе использован метод "замороженных" коэффициентов, т.е. принято, что скорость изменения режима работы ПГ во всех случаях столь мала по сравнению со скоростью протекания переходного процесса в системе, что изменением коэффициентов передаточных функций за время переходного процесса можно пренебречь и рассматривать систему как квазистационарную.

При расчетах статистики регулирования принято, что датчики-уровнемеры оборудованы усовершенствованными заборными устройствами (см. гл. 3). Показано, что при пуске и работе блока парогенератор-турбина со скользящими параметрами пара недопустимо велики статические ошибки САР питания, вызываемые погрешностью сигнала датчика-паромера. Применение автоматической коррекции сигнала уровнемера, а также использование нормирующих преобразователей, осуществляющих операцию извлечения квадратного корня из сигналов водомера и паромера, приводит к возрастанию статических ошибок и поэтому нежелательно. Статические ошибки при пуске парогенератора на общую магистраль и при включении или отключении ПВД относительно невелики.

Устойчивость САР исследовалась путем построения областей Д-разбиения по ряду параметров для различных режимов работы ПГ и различных величин постоянных времени и параметров динамической настройки регулирующего прибора. В основу расчетов были положены численные значения запаздывания в объекте τ , полученные экспериментально для парогенератора ТП-230. Чтобы учесть влияние случайных флуктуаций динамических параметров τ и K_1 , расчеты выполнялись для трех значений этих параметров - для математического ожидания, максимальной и минимальной величин.

Всего было рассмотрено около 80 вариантов различных соотношений параметров САР. В 30 из них построение кривых

Д-разбиения производилось по обычной методике с помощью ЭЦВМ "Минск-22", а в остальных случаях - путем перестроения (деформации) амплитудно-фазовых характеристик и кривых Д-разбиения по методу граничных частотных характеристик, разработанному автором совместно с доктором технических наук Г.И.ХУТСКИМ.

При анализе характеристического уравнения системы установлено, что влияние изменения плотности воды и пара в барабане на коэффициент усиления уровнемера K_2 компенсируется соответствующим изменением свойств объекта регулирования (коэффициента усиления K_1) и потому не ухудшает устойчивость системы. Следовательно, нет необходимости в применении автоматической коррекции сигнала уровнемера по давлению (температуре) в барабане, которая усложняет схему регулирования и ухудшает ее статические свойства.

Отклонение давления в барабане сказывается на устойчивости системы главным образом из-за изменения скорости регулирования, вызываемого изменением перепада давлений на регулирующем клапане. Вследствие квадратичного характера зависимости сигнала водомера от расхода увеличение перепада давлений при низких нагрузках мало влияет на устойчивость, но в некоторых случаях может заметно ее ухудшить при больших нагрузках.

Для трехимпульсной САР питания, как и для других двухконтурных систем, следует различать устойчивость по внутреннему быстродействующему контуру и устойчивость по внешнему контуру (по отношению к уровню в барабане).

Определяющее влияние на устойчивость САР по внутреннему контуру оказывает динамическая настройка регулирующего прибора. Неустойчивость по внутреннему контуру, вызывающая резкие колебания расхода питательной воды, может иметь место при удовлетворительном качестве поддержания уровня в барабане. Устойчивость по внешнему контуру в основном определяется ве-

личиною комплекса $\tau \frac{K_1 K_2}{K_3}$ (где K_3 - коэффициент усиления водомера), причем она ухудшается при увеличении комплекса.

Исследование качества регулирования производилось путем построения вещественных частотных характеристик (с помощью ЭЦВМ "Минск-22") и кривых переходных процессов относительно

уровня в барабане и расхода питательной воды при скачкообразном возмущении задающим воздействием и расходом пара.

В результате проведенного исследования сформулированы некоторые общие требования, которые следует учитывать при расширении диапазона работы САР питания:

1. Необходимо уменьшить статические ошибки САР, вызываемые изменением сигнала паромера при пуске и работе блока парогенератор-турбина со скользящими параметрами пара.

2. Применение автоматической коррекции сигналов датчиков по уровню и расходу питательной воды на изменение параметров рабочей среды нецелесообразно.

3. Величина математического ожидания комплекса $\tau \frac{K_1 K_2}{K_3}$ во всех режимах работы ПГ должна изменяться не более чем в 2-3 раза. Выбор настроечных параметров внешнего контура K_2 и K_3 следует производить с учетом вероятностных свойств объекта для максимально возможной величины произведения τK_1 .

4. Выбор параметров динамической настройки регулирующего прибора следует производить исходя из динамических свойств только быстродействующего контура САР с таким расчетом, чтобы во всех возможных режимах степень затухания по этому контуру была $\psi \geq 0,9-0,95$. Изменение динамической настройки при переходе от одного режима работы ПГ к другому нецелесообразно.

На основании результатов исследования и работ Н.Д.Александровой, В.Я.Ротача, А.С.Рубашкина в диссертации разработана упрощенная инженерная методика и построены (с помощью ЭЦВМ "Минок-22") номограммы для анализа двухконтурных САР питания. По номограммам легко можно выделить области устойчивости, заданного запаса устойчивости по модулю и фазе, заданной степени устойчивости и колебательности в координатах любых параметров САР питания (отдельно для каждого контура). Процесс построения сводится к деформации соответствующих номограмм.

Вторая часть диссертации, включающая главы 3, 4 и 5, посвящена решению некоторых практических задач автоматизации питания парогенераторов с естественной циркуляцией, работающих в широком диапазоне режимов.

В третьей главе рассмотрены вопросы использования в переходных режимах сниженных показателей уровня

воды в барабане и датчиков-уровнемеров гидростатического типа. Выполнен анализ работы дистанционного гидростатического уровнемера и показано, что его ошибка при отклонении давления в барабане от расчетной величины содержит две составляющие — ошибку градуировки и ошибку нуля.

Ошибка градуировки, величина которой пропорциональна отклонению уровня и не зависит от конструкции заборного устройства, обусловлена несоответствием действительных плотностей воды и пара в барабане их расчетным значениям. Ее наличие проявляется в том, что при пониженных давлениях зарегистрированные прибором отклонения уровня от среднего положения больше, чем действительные. Получено условие отсутствия ошибки градуировки и предложена схема автоматической коррекции показаний уровнемера по температуре в барабане [3].*)

Ошибка нуля есть ошибка уровнемера при неизменном среднем положении уровня и отклонении давления в барабане от расчетного. Установлено, что ее величина определяется главным образом конструкцией заборного устройства уровнемера. Получено условие отсутствия ошибки нуля и предложен весьма простой способ сведения ее к минимуму [1]. Испытания усовершенствованной по этому способу конструкции заборного устройства полностью подтвердили выводы анализа [8].

Испытания подтвердили также выводы некоторых авторов о том, что температурная неравномерность по высоте уравнительного сосуда и водоуказательной колонки, обусловленная охлаждением их окружающим воздухом, оказывает заметное влияние на правильность показаний дистанционных уровнемеров и, особенно, водоуказательных колонок. Оценена величина погрешностей колонок в различных условиях и показано, что она зависит от положения уровня, от величины давления, знака и скорости его изменения. Предложена конструкция водоуказательной колонки с паровым обогревом корпуса [10].

На основе упомянутого выше способа ликвидации ошибки нуля разработаны и испытаны усовершенствованные варианты заборных устройств уровнемеров с паровым обогревом плюсовой камеры

*) Схемы автоматической коррекции были также разработаны в НИИТеплоприборе и в Институте автоматики при Госплане УССР.

(так называемые заборные устройства с полубогриваемой плюсовой трубкой) [II, I2].

В диссертации разработаны принципиально новые конструкции заборных устройств, которые также обеспечивают отсутствие погрешности нуля уровнемеров. Устройство с использованием сифонного эффекта [4] сочетает конструктивную простоту с удобством в монтаже и эксплуатации. Испытания устройства, проведенные при номинальном давлении в барабане, во время пусков и остановов ПГ, показали его высокие качества [II, I2].

Постоянный уровень в плюсовой камере заборного устройства, соединенного с опускной системой парогенератора, может быть установлен в любой точке по высоте барабана [2, II]. При использовании заборного устройства этого типа не требуется дополнительная коррекция нуля уровнемера после его тарировки в лаборатории. Применение устройства в схеме защиты ПГ от пуска воды из барабана также является перспективным.

Ч е т в е р т а я г л а в а посвящена разработке регулирующих клапанов для всережимных и пусковых САР питания.

На основе работ В.В.Ароновича и М.С.Слободкина, Д.Ф.Гуревича, Б.И.Динабурга, М.И.Имбрицкого и др. произведена классификация и анализ регулирующей трубопроводной арматуры по принципу основного действия. Установлено, что известные конструкции не удовлетворяют в полной мере заданным техническим условиям. Наиболее пригодны для применения в схемах всережимных и пусковых САР питания самоуплотняющиеся шиберные и дисковые клапаны, причем дисковые клапаны имеют некоторые преимущества перед шиберными.

Рассмотрены общие представления о работе упругого контактного металлического уплотнения (работы П.Е.Амосова, Д.Ф.Гуревича, П.И.Киселева, Л.И.Экслера, Е.Мауер и др.) и некоторые особенности силового взаимодействия деталей затвора в самоуплотняющихся клапанах. Сделан вывод, что для этого типа клапанов оптимальная величина контактного давления должна быть значительно меньше, чем для запорной арматуры. Имеющиеся экспериментальные данные позволяют предполагать, что при относительно небольших значениях контактного давления шиберные и дисковые клапаны могут обеспечивать достаточную плотность

закрытия и длительно работать без повреждения уплотнительных поверхностей. Предложена формула для определения величины контактного давления в самоуплотняющихся клапанах, в которой распределение давления в зазоре неподвижного уплотнения учитывается коэффициентом $0 < \alpha \leq 1$.*)

Создана экспериментальная установка для испытания конструктивных схем и исследования работы затворов самоуплотняющихся клапанов. Проведены пробные опыты, которые подтверждают выводы анализа.

Чтобы решить вопрос о возможности и целесообразности использования дисковых клапанов, на специальном стенде проведены испытания дискового клапана D_y 50 мм на многократное перекрытие потока воды [9, 21]. Испытания показали, что дисковые клапаны в условиях многократного перекрытия потока среды при больших перепадах давлений обладают высокой плотностью закрытия и могут конкурировать с запорными вентилями. Нерегулируемый пропуск клапана в начале испытаний практически отсутствовал, а в конце испытаний при всех материалах запорных органов не превышал 0,05 т/ч. Вместе с тем выяснено, что большая сила прижатия золотника к седлу, обеспечивающая высокую плотность закрытия дисковых клапанов, является одновременно и причиной основных их недостатков - интенсивного износа и частых повреждений (задилов) уплотнительных поверхностей и большого момента сопротивления повороту золотника, требующего применения сервоприводов повышенной мощности.

Существует два эффективных метода борьбы с этими недостатками, позволяющих расширить область применения дисковых клапанов: а) тщательный подбор материалов запорных органов; б) уменьшение контактного давления до оптимальной величины, при которой отсутствуют повреждения рабочих поверхностей и в то же время сохраняется плотность клапана.

Изготовление запорных органов из материалов, резко различающихся по твердости, позволяет повысить их стойкость против задилов и увеличить самопритираемость. Вместе с тем твердость и эрозийностойкость поверхностей должны быть, по возмож-

*) Независимо от автора подобный коэффициент был введен П.Е.Амосовым для характеристики уплотнений вращающихся валов.

ности, высокими. Можно ожидать, что положительный эффект даст одновременное значительное повышение твердости обеих сопряженных уплотнительных поверхностей (и седла и золотника), при котором существенное различие в их твердости будет сохранено (например, при выполнении седла из сверхтвердых сплавов, керамических и других неметаллических материалов, а золотника - с наплавкой твердыми сплавами). Разработана конструкция съемного седла, позволяющая применять седла из различных, в том числе неметаллических, материалов.

Разработаны и испытаны четыре типа дисковых клапанов с гидравлической разгрузкой, величина которой пропорциональна перепаду давлений на клапане [6, 18, 21]: клапаны со специальным разгрузочным поршнем, с внутренней разгрузочной камерой, с вспомогательным шпинделем, с выносной камерой противодавления. Они не исключают друг друга, так как каждая конструкция обладает специфическими особенностями. Испытания и многолетний опыт эксплуатации показали, что самоуплотняющиеся дисковые клапаны с гидравлической разгрузкой и съемным седлом имеют существенные преимущества перед серийными конструкциями регулирующих питательных клапанов. Они обеспечивают хорошее качество регулирования расхода воды во всех режимах, включая пуск и останов ПГ. Пропуск клапанов в закрытом положении практически отсутствует.

В п я т о й г л а в е приведены описание принципа работы и результаты испытаний усовершенствованной схемы САР питания, предназначенной для работы в широком диапазоне режимов, включая пуски парогенератора и блока [7]. Она проще и надежнее известной каскадной схемы регулирования питания, реализуется на базе стандартной аппаратуры автоматики и не требует демонтажа существующего оборудования при внедрении на действующих парогенераторах.

Особенность схемы состоит в том, что сигналы от датчика-паромера, основного и вспомогательного датчиков-водомеров попадают на вход регулирующего прибора через дифференциатор, коэффициент усиления которого принят равным единице.

В установленном режиме выходной сигнал дифференциатора всегда равен нулю, на регулирующий прибор поступает только

сигнал от датчика-уровнемера, уравновешивающий сигнал задания. Поэтому уровень в барабане поддерживается в соответствии с заданием без статической ошибки.

В динамике регулирования дифференциатор можно рассматривать в качестве усилительного звена, если его постоянная времени достаточно велика. При этом дифференциатор практически не оказывает влияния на работу САР. Следовательно, в динамике регулирования в рабочих режимах усовершенствованная САР ведет себя точно так же, как и "классическая" трехимпульсная.

Из-за квадратичного характера зависимости сигнала основного датчика-водомера от расхода крутизна его характеристики при малых расходах воды недостаточна для обеспечения устойчивого регулирования питания. Для нормализации работы САР при пониженных нагрузках и в периоды пусков и остановов ПГ применен вспомогательный датчик - измеритель малых расходов питательной воды. Крутизна суммарного сигнала основного и вспомогательного водомеров обеспечивает устойчивую работу САР во всем диапазоне режимов. Таким образом, при малых нагрузках, когда сигналами паромера и основного водомера можно пренебречь, усовершенствованная САР питания получает сигналы от уровнемера и вспомогательного водомера и в динамике регулирования ведет себя как обычная двухимпульсная система (вместе с тем она не имеет статической ошибки).

Проверка работоспособности усовершенствованной схемы производилась на парогенераторе среднего давления типа БКЗ-75 Барановичской ТЭЦ и на парогенераторе высокого давления типа ПК-20 Смоленской ГРЭС [17, 19]. Сниженные указатели уровня воды в барабане и датчики-уровнемеры были оборудованы усовершенствованными заборными устройствами (гл. 3). Для повышения плотности в закрытом положении основные питательные клапаны D_y 100 мм (с цилиндрическим поворотным золотником) заменены дисковыми клапанами с разгрузкой (гл. 4).

Испытания усовершенствованной САР, проведенные в условиях работы ПГ под нагрузкой, а также во время пусков, показали, что предложенная схема в сочетании с защитой от перепитки ПГ, действующей на открытие (и закрытие) трубопровода аварийного слива воды из барабана, и блокировкой, включающей линию рециркуляции при полном закрытии регулирующего клапана, обе-

спечивает хорошее качество регулирования питания во всех режимах работы парогенератора.

В заключительной части пятой главы приведены сведения о промышленном внедрении результатов исследования.

По имеющимся у автора данным, предложенный способ компенсации ошибки нуля дистанционных уровнемеров-дифманометров и усовершенствованные по этому способу заборные устройства уровнемеров в настоящее время являются общепризнанными и широко используются на электрических станциях СССР. В Белорусской энергосистеме усовершенствованные заборные устройства были испытаны и внедрены на Василевичской и Смолевичской ГРЭС, Барановичской ТЭЦ, Минской ТЭЦ-3 и Могилевской ТЭЦ-1.

О положительном опыте эксплуатации и испытаний усовершенствованных заборных устройств в ряде энергосистем страны сообщили В.А.Деянов, Н.С.Долгоносков, Б.Г.Егоров, Б.А.Койфман и П.Г.Шатхан, Л.В.Корогод и Р.Н.Сафин, А.И.Сергиенко и др., Б.Г.Тиминский. В 1963 году ОРГРЭС на основании анализа материалов по наладке и эксплуатации заборных устройств на ряде электрических станций Юга и Урала, в том числе на Верхне-Тагильской, Эмиевской, Луганской, Приднепровской, Старо-Бешевской ГРЭС, официально рекомендовал котлостроительным заводам оснащать все поставляемые ими парогенераторы барабанного типа усовершенствованными заборными устройствами для подключения датчиков авторегуляторов питания, сниженных уровнемеров, приборов сигнализации и защиты.

По сведениям ЦСУ СССР, новые конструкции заборных устройств уровнемеров внедрены, помимо электрических станций Министерства энергетики и электрификации СССР, на ряде предприятий союзных министерств: Оборонной промышленности, Черной металлургии, Нефтяной и химической промышленности, Сельскохозяйственного машиностроения.

На электрических станциях Белорусской энергосистемы получили распространение разработанные автором конструкции дисковых клапанов на условные проходы от Ду 20 до Ду 175 мм.

Всережимные САР питания, включающие усовершенствованную схему регулирования, новые конструкции заборных устройств уровнемеров и регулирующих питательных клапанов, внедрены на

Смолевичской ГРЭС (парогенераторы ПК-20), Барановичской ТЭЦ (БКЗ-75), Минской ТЭЦ-3 (ТП-230) и Могилевской ТЭЦ-1 (ТП-35). Начаты работы по внедрению всережимной САР питания на парогенераторах ТП-80 и ТП-87 Минской ТЭЦ-3. На Василевичской ГРЭС (ПК-14) внедрены пусковые САР питания.

Техническая документация на разработанные устройства была передана многим предприятиям и ведомствам страны по их запросам. По имеющимся у автора сведениям, в настоящее время на основе предложенных технических решений в ряде энергосистем начато внедрение всережимных и пусковых САР питания.

В приложении к диссертации дано краткое изложение метода граничных частотных характеристик, использованного в работе для анализа устойчивости САР питания (гл.2).

Отмечено, что существующие частотные критерии устойчивости и общепринятая методика построения кривых Д-разбиения не учитывают структуру САР, а рассматривают всю систему (в замкнутом или разомкнутом состоянии) целиком. Поэтому изменения структуры или параметров, которые затрагивают только часть системы, при расчетах воспринимаются в качестве изменений всей системы; при каждом новом расчете вся информация о динамических свойствах системы перерабатывается заново, а полученные ранее результаты фактически не используются. Даже в пределах исследования одного варианта системы отдельные расчеты недостаточно увязаны друг с другом.

В диссертации показано, что анализ устойчивости замкнутой САР можно упростить, если при расчетах разделить ее на две части в соответствии с условиями и задачами исследования и учитывать взаимосвязь частотных характеристик выделенных частей [16, 20]. В самом деле, устойчивость всей системы в равной мере зависит от свойств обеих ее частей. Если динамические свойства одной части САР заданы, то требование устойчивости системы в целом налагает вполне определенные ограничения на динамические свойства второй части. Эти ограничения определяются, в частности, известным соотношением, связывающим частотные характеристики частей системы, выведенной на границу устойчивости:

$$W_1(j\omega) = G_{II}(j\omega), \quad (2)$$

где $W_I(j\omega)$ - амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) части I; $G_{II}(j\omega)$ - обратная АФХ части II.

Путем анализа уравнения (2) установлено, что по отношению к АФХ $W_I(j\omega)$ любой части системы обратная АФХ $G_{II}(j\omega)$ всей оставшейся системы играет такую же роль, как кривая Д-разбиения по отношению к отдельному параметру. В силу инверсии прямых и обратных АФХ и формальной равнозначимости частей системы сделанный вывод остается справедливым, если в нем характеристики $W_I(j\omega)$ и $G_{II}(j\omega)$ поменять местами.

Таким образом, частотные характеристики можно рассматривать в качестве Д-разбиений по отдельным частям системы. Из такого подхода к частотным характеристикам вытекают следующие важные для практических расчетов выводы.

1. При выделении областей Д-разбиения нет необходимости каждый раз составлять характеристическое уравнение системы и разрешать его относительно интересующих нас параметров. Построение кривых Д-разбиения сводится к перестроению (деформации) частотных характеристик частей системы. В диссертации рассмотрена методика построения кривых Д-разбиения по одному комплексному и двум вещественным параметрам, получены выражения, определяющие границы Д-разбиения в плоскости параметров настройки идеальных П-, И-, ПИ- и ПИД-регуляторов.

2. При частичном изменении структуры и параметров системы нет необходимости производить построение границ Д-разбиения заново, как для новой системы; достаточно перестроить (деформировать) уже имеющиеся кривые. Так как между ними и частотными характеристиками существует прямая связь, то относительно просто можно установить некоторые общие правила деформации кривых Д-разбиения. Получены формулы, связывающие выражения границ Д-разбиения по одному комплексному параметру для различных случаев одно- и двухконтурных систем.

Отмеченные свойства кривых Д-разбиения частично использовались в работах Э.С.Лукашова и ряда других авторов, однако лежащая в основе этих свойств общность кривых Д-разбиения с частотными характеристиками вскрыта не была.

3. Об устойчивости системы можно судить непосредственно по виду частотных характеристик ее частей, не производя построения вспомогательных кривых - годографа Михайлова или го-

дографа Найквиста, что вытекает из сущности кривых Д-разбиения. В диссертации предложен соответствующий модифицированный амплитудно-фазовый критерий устойчивости.

Пусть известны

$$W_I(j\omega) = A_I(\omega) e^{j\varphi_I(\omega)}; \quad G_{II}(j\omega) = B_{II}(\omega) e^{j\psi_{II}(\omega)},$$

где $A_I(\omega)$, $\varphi_I(\omega)$ - амплитудно- и фазо-частотные характеристики части I; $B_{II}(\omega)$, $\psi_{II}(\omega)$ - обратные амплитудно- и фазо-частотные характеристики части II.

Согласно амплитудно-фазовому критерию устойчивости замкнутая САР устойчива, если разность между числом положительных (совершающихся против часовой стрелки при возрастании частоты ω) и отрицательных переходов годографа АФХ разомкнутой системы через участок действительной оси $+I \rightarrow +\infty$ равна $k/2$, где k - число корней характеристического уравнения разомкнутой системы, имеющих положительную действительную часть.

АФХ разомкнутой системы равна:

$$W(j\omega) = \frac{A_I(\omega)}{B_{II}(\omega)} e^{j[\varphi_I(\omega) - \psi_{II}(\omega)]} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$$

При переходе годографа $W(j\omega)$ через участок вещественной оси $+I \rightarrow +\infty$ выполняются следующие два условия.

I. Пересечению годографом $W(j\omega)$ положительной части вещественной оси соответствует условие

$$\varphi(\omega) = 0; \quad \varphi_I(\omega) = \psi_{II}(\omega). \quad (3)$$

При этом фазо-частотные характеристики $\varphi_I(\omega)$ и $\psi_{II}(\omega)$ пересекаются, а векторы $\overline{W}_I(j\omega)$ и $\overline{G}_{II}(j\omega)$ совпадают по направлению. Заметим, что положительному переходу годографа $W(j\omega)$ через вещественную ось соответствует возрастание фазо-частотной характеристики $\varphi(\omega)$, т.е. при положительном

переходе $\frac{d\varphi_I(\omega)}{d\omega} > \frac{d\psi_{II}(\omega)}{d\omega}$ и поворот вектора $\overline{W}_I(j\omega)$ относительно вектора $\overline{G}_{II}(j\omega)$ совершается в положительном направлении. Такое пересечение фазо-частотных характеристик и совмещение направления векторов $\overline{W}_I(j\omega)$ и $\overline{G}_{II}(j\omega)$ назовем положительным.

2. Пересечению годографом $W(j\omega)$ именно участка вещественной оси $+1 \rightarrow +\infty$ соответствует дополнительное условие

$$A(\omega) > 1; \quad A_I(\omega) > B_{II}(\omega), \quad (4)$$

т.е. длина вектора $\overline{W}_I(j\omega)$ больше длины вектора $\overline{G}_{II}(j\omega)$.

На основании амплитудно-фазового критерия устойчивости и условий (3) и (4) в диссертации сформулирован следующий модифицированный амплитудно-фазовый критерий: замкнутая система устойчива, если разность между числом положительных и отрицательных совмещений направления векторов $\overline{W}_I(j\omega)$ и $\overline{G}_{II}(j\omega)$, для которых выполняется неравенство (4), равна $k/2$.

Возможны различные формулировки этого критерия применительно к формам частотных характеристик и к различным частным случаям. Для частного случая, когда разомкнутая система устойчива ($k = 0$), а годограф $W(j\omega)$ не имеет формы клюва (АФХ первого рода), модифицированный амплитудно-фазовый критерий устойчивости сформулирован в следующем виде: замкнутая система устойчива, если АФХ произвольной части системы охватывается обратной АФХ всей оставшейся системы при всех частотах, при которых векторы этих характеристик совпадают по направлению. В диссертации рассмотрены также формулировки модифицированного амплитудно-фазового критерия применительно к обратным АФХ и к амплитудно- и фазо-частотным характеристикам частей САР.

Показано, что с помощью предложенного критерия устойчивости можно не только определить, устойчива ли заданная САР, но и решить некоторые вопросы синтеза. Использование в практических расчетах модифицированного амплитудно-фазового критерия устойчивости и методики построения кривых Д-разбиения, основанной на их общности с частотными характеристиками, существенно сокращает объем вычислительной работы.

В диссертации показано, что метод граничных частотных характеристик полностью применим для исследования САР на заданный запас устойчивости по модулю и фазе, а также на заданную степень устойчивости и колебательности.

ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование динамических свойств зоны регулирования уровня в барабане парогенератора ТП-230. Оно показало, что по каналу регулирования уровня ПГ целесообразно рассматривать как вероятностный объект с постоянной структурой и переменными параметрами. Основные динамические параметры объекта - запаздывание и коэффициент усиления интегрирующего звена - не коррелированы ни между собой, ни с величиной возмущения, а их распределения отличаются от нормального и удовлетворительно описываются распределением Шарлье.

2. Получены оценки математического ожидания и дисперсии величины запаздывания при различных режимах работы ПГ. Статистически достоверно установлено, что величина запаздывания зависит от знака возмущения, вида сжигаемого топлива, нагрузки ПГ и температуры питательной воды. Динамические свойства зоны регулирования уровня ухудшаются при пусках и остановках ПГ. В этих условиях эквивалентное запаздывание в 3-4 раза больше, чем в обычных рабочих режимах.

3. На основе результатов экспериментов выполнено аналитическое исследование трехимпульсной САР питания при различных нагрузках и давлениях. Сформулированы требования, которые необходимо учитывать при расширении диапазона работы САР. Разработана упрощенная инженерная методика и построены номограммы для анализа трехимпульсной САР питания.

4. Разработана и испытана усовершенствованная схема многоимпульсной САР питания, предназначенная для работы в широком диапазоне режимов, включая пуск и останов ПГ и блока.

5. Выполнен анализ работы дистанционного гидростатического уровнемера. Показано, что его ошибка при отклонении давления от расчетного содержит две составляющие - ошибку нуля, зависящую от конструкции заборного устройства уровнемера, и ошибку градуировки. Сформулированы условия и предложены методы ликвидации этих ошибок.

6. Разработаны и испытаны пять типов заборных устройств, обеспечивающих правильную работу уровнемеров при отклонении давления от расчетного и среднем положении уровня воды в ба-

рабана. Разработана конструкция водоуказательной колонки с паровым обогревом и устройство для защиты ПГ от аварийного положения уровня.

7. Произведена классификация и анализ конструкций регулирующей трубопроводной арматуры. Выявлена целесообразность использования в схемах всережимных и пусковых САР питания самоуплотняющихся дисковых клапанов. Рассмотрены некоторые особенности силового взаимодействия деталей затвора в самоуплотняющихся клапанах.

Проведены испытания дискового клапана Ду 50 мм. Установлено, что клапаны этого типа обладают высокой плотностью затвора при многократном перекрытии потока среды в условиях больших перепадов давлений. Намечены пути совершенствования дисковых клапанов.

8. Разработаны и испытаны четыре типа дисковых клапанов Ду 50-175 мм с гидравлической разгрузкой, позволяющей устранить основные недостатки дисковых клапанов.

9. Предложенные конструкции заборных устройств уровнемеров и регулирующих питательных клапанов, а также усовершенствованная схема САР питания внедрены в Белорусской энергосистеме на Василевичской и Смолевичской ГРЭС, Барановичской ТЭЦ, Минской ТЭЦ-3 и Могилевской ТЭЦ-1. Некоторые разработки уже получили широкое распространение на электростанциях СССР.

10. Рассмотрены некоторые вопросы применения частотных характеристик для исследования линейных САР. Установлено, что прямые и обратные амплитудно-фазовые характеристики можно рассматривать в качестве Д-разбиений по отдельным частям системы автоматического регулирования. На основании такого подхода разработаны приемы, упрощающие исследование линейных САР. Сформулирован модифицированный амплитудно-фазовый критерий устойчивости, который позволяет судить об устойчивости САР по виду частотных характеристик ее частей.

ж ж

ж

Основные результаты диссертационной работы доложены на семинаре "Кибернетика и автоматическое управление" Научного Совета по кибернетике АН УССР (Одесса, 1969) и опубликованы в следующих изобретениях и статьях.

И з о б р е т е н и я

1. ГУРЕВИЧ Э.З., ВАРДОМСКИЙ Э.К. Способ присоединения плюсовой импульсной трубки к заборному сосуду сниженного указателя уровня воды в барабане парового котла. Авторское свидетельство № 128867, "Бюллетень изобретений", 1960, № II.

2. ГУРЕВИЧ Э.З. Устройство для защиты барабанного парового котла от аварийного положения уровня. Авторское свидетельство № 143814, "Бюллетень изобретений", 1962, № I.

3. ГУРЕВИЧ Э.З. Устройство для измерения уровня воды в барабане парового котла. Авторское свидетельство № 151983, "Бюллетень изобретений", 1962, № 23.

4. ГУРЕВИЧ Э.З., ТАМАРИН А.И. Заборное устройство для сниженного указателя уровня воды в барабане парового котла. Авторское свидетельство № 177902, "Бюллетень изобретений", 1966, № 2.

5. ГУРЕВИЧ Э.З., ТЫВОРСКАЯ Р.И., ФЕЛЬДМАН А.И. Самоуплотняющийся регулирующий клапан. Авторское свидетельство № 187464, "Бюллетень изобретений", 1966, № 20.

6. ГУРЕВИЧ Э.З., ЗЕЛИО Э.А. Регулируемый клапан. Авторское свидетельство № 204076, "Бюллетень изобретений", 1967, № 21.

7. ГУРЕВИЧ Э.З., ХУТСКИЙ Г.И. Трехимпульсный регулятор питания. Авторское свидетельство № 230832, "Бюллетень изобретений", 1968, № 35.

С т а т ь и

8. ВАРДОМСКИЙ Э.К., ГУРЕВИЧ Э.З. Усовершенствование конструкции уравнительного сосуда. "Электрические станции", 1960, № 6, 36-38.

9. ГУРЕВИЧ Э.З., САГАЛОВИЧ Л.Д. Регулирующий клапан для трубопроводов. "Промышленность Белоруссии", 1963, № 5, 35-38.

10. ГУРЕВИЧ Э.З., САГАЛОВИЧ Л.Д. О погрешностях водоуказательных колонок. "Энергетик", 1964, № 8, 12-14.

11. ГУРЕВИЧ Э.З. Новые заборные устройства для уровнемеров. "Электрические станции", 1965, № 12, 23-27.

12. ГУРЕВИЧ Э.З., ВАРДОМСКИЙ Э.К., НЕГНЕВИЦКИЙ В.Б., САГАЛОВИЧ Л.Д. Испытания и опыт эксплуатации уровнемеров. Сб. "Опыт внедрения устройств автоматики в Белорусской энергоси-

стеме", Минск, 1967, 46-57.

13. ГУРЕВИЧ Э.З., ФЕЛЬДМАН А.И., СИЛИЧ Б.М. Улучшение регулирования питания и перегрева котлов БКЗ-75 Барановичской ТЭЦ. Сб. "Экспериментальные и наладочные работы на электростанциях Белорусской энергосистемы", Минск, 1967, 56-60.

14. ГУРЕВИЧ Э.З., ФЕЛЬДМАН А.И. Дисковые клапаны со съёмным седлом. "Энергетик", 1968, № I, 19-20.

15. ГУРЕВИЧ Э.З., ХУТСКИЙ Г.И., КУТЕНЬ Э.М. Исследование САР питания барабанного котла при различных нагрузках и давлениях. "Энергомашиностроение", 1968, № 6, 4-7.

16. ГУРЕВИЧ Э.З., ХУТСКИЙ Г.И. К вопросу о применении частотных характеристик для исследования статической устойчивости режимов электрических систем. "Известия ВУЗов. Энергетика", 1968, № II, 90-94.

17. ГУРЕВИЧ Э.З., ФЕЛЬДМАН А.И. Расширение диапазона работы регулятора питания котлоагрегата БКЗ-75. Сб. "Экспериментальные и наладочные работы предприятия Белорусэнергонадзора", Минск, 1968, 20-26.

18. ГУРЕВИЧ Э.З., ФЕЛЬДМАН А.И. Новые конструкции самоуплотняющихся дисковых клапанов. Сб. "Опыт внедрения автоматики и вычислительной техники в Белорусской энергосистеме", Минск, 1969, 6-13.

19. ГУРЕВИЧ Э.З., ФЕЛЬДМАН А.И., ХУТСКИЙ Г.И. Усовершенствованный регулятор питания барабанного котла. "Электрические станции", 1969, № 12, 32-35.

20. ГУРЕВИЧ Э.З., ХУТСКИЙ Г.И. Применение граничных частотных характеристик для исследования устойчивости систем автоматического регулирования теплоэнергетического оборудования. Сб. "Теплоэнергетика", вып. I, изд-во "Высшая школа", Минск, 1970, 127-136.

21. ГУРЕВИЧ Э.З., ФЕЛЬДМАН А.И. Испытания самоуплотняющихся дисковых клапанов. "Энергомашиностроение", 1970, № 6, 40-43.

АТ 03324. Подписано в печать 10.06.1971. Формат 60x84 I/16
I,5 печ. л.; I,5 уч.-изд. л. Тираж 250. Зак. 166. Бесплатно

Ротапринт БелСЭ АН БССР. Минск, Академическая, 15-а