

УДК 62–533.6

## АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОГРЕВОМ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА КТМ

А.Г. Коровиков, В.М. Павлов\*, Д.А. Ольховик

Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов

\*Томский политехнический университет

E-mail: Korovikov@nnc.kz

*Разработаны двухконтурные алгоритмы управления подсистемой управления прогревом вакуумной камеры токамака КТМ, с локальным уровнем регулирования и групповым регулированием по зонам нагрева. Определена структура и состав комплекса технических средств управления прогревом вакуумной камеры токамака КТМ. Разработаны алгоритмы сбора, регистрации и контроля параметров источника питания. Показана возможность проведения регулярных режимов прогрева как одного из этапов вакуумной подготовки камеры.*

### Ключевые слова:

*Система управления, индукционный нагрев, вакуумная камера, алгоритм управления.*

### Key words:

*Control system, induction heating, vacuum chamber, algorithm of control.*

Наиболее значимые результаты в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза были достигнуты на установках типа токамак. В настоящее время ведутся работы по реализации проекта строительства Казахстанского материаловедческого токамака КТМ (Казахстанский токамак материаловедческий) в г. Курчатов, Республика Казахстан.

Параметры плазмы в установках токамак определяются не только количеством и составом остаточного газа в объеме, но и состоянием поверхности разрядной камеры, которая является источником поступления в плазму различных примесей: паров воды, кислорода, углерода и т. п. С целью снижения количества примесей в вакуумной камере в токамаке КТМ используется ряд технологических систем [1], обеспечивающих общие условия проведения разряда.

Для нормальной работы токамака КТМ необходима синхронная, безопасная и надежная работа всех технологических систем. Поэтому требуется объединение многочисленного оборудования в единый комплекс и создание условий обеспечения как безопасности работы персонала и сохранности техники, так и гибкости управления в сочетании с представлением полной информации о режимах работы, состоянии оборудования и проводимых экспериментах [2].

Вакуумная камера и патрубки должны прогреваться до температуры 200 °С с абсолютной погрешностью  $\pm 10$  °С с целью обезгаживания и уплотнения вакуумных конструктивов. Процесс должен проходить с обеспечением контроля равномерности прогрева [3]. Для обеспечения равномерности прогрева вакуумная камера токамака КТМ разделена на 6 зон нагрева (крышка, цилиндр внешний, конус, днище, патрубки, внутренний цилиндр). Нагреватели, установленные на вакуумной камере, разделены на 5 групп и подключены к пяти независимым источникам питания,

шестая зона вакуумной камеры (внутренний цилиндр) прогревается с помощью системы индукционного нагрева.

Для контроля температуры на поверхности камеры и самих нагревателей установлены 39 термопар. В каждой тепловой зоне устанавливается по шесть датчиков: два – основной комплект, два – вспомогательный комплект и два – температура нагревателя  $T_{\text{наг}}$  – используется системой прогрева и поддержания температуры, для аварийного отключения нагревателей в случае превышения ими температуры 350 °С. Дополнительно три датчика устанавливаются на внутренней части вакуумной камеры.

В качестве электронагревателя используется кабель КНМСНХ–0,283 сопротивлением 4,5 Ом/м. Отрезки кабеля длиной ~18 м укладываются с шагом 100...150 мм на наружной поверхности камеры и патрубков. Общая установленная мощность нагревателей 30 кВт. Напряжение питания 230 В (50 Гц).

Система индукционного нагрева обеспечивает питание обмотки индуктора центрального соленоида током до 250 А, напряжением до 700 В промышленной частоты с возможностью автоматического регулирования подводимой мощности сигналом, подаваемым на вход источника питания. Темп разогрева ограничивается максимальной подводимой суммарной мощностью в диапазоне от 3 до 98 %. Управление регулятором ПОТ–250Е–700 осуществляется по интерфейсу RS–485 с последующим преобразованием в сигнал 0...5 мА, пропорциональный выходному току источника питания [4].

В установленном режиме, камера отдает в окружающую среду около 9 кВт тепловой энергии. Равномерность подъема и поддержания температуры на поверхности камеры должна обеспечиваться регулированием мощности в каждой из шести групп нагревателей.

В состав объекта автоматизации входят:

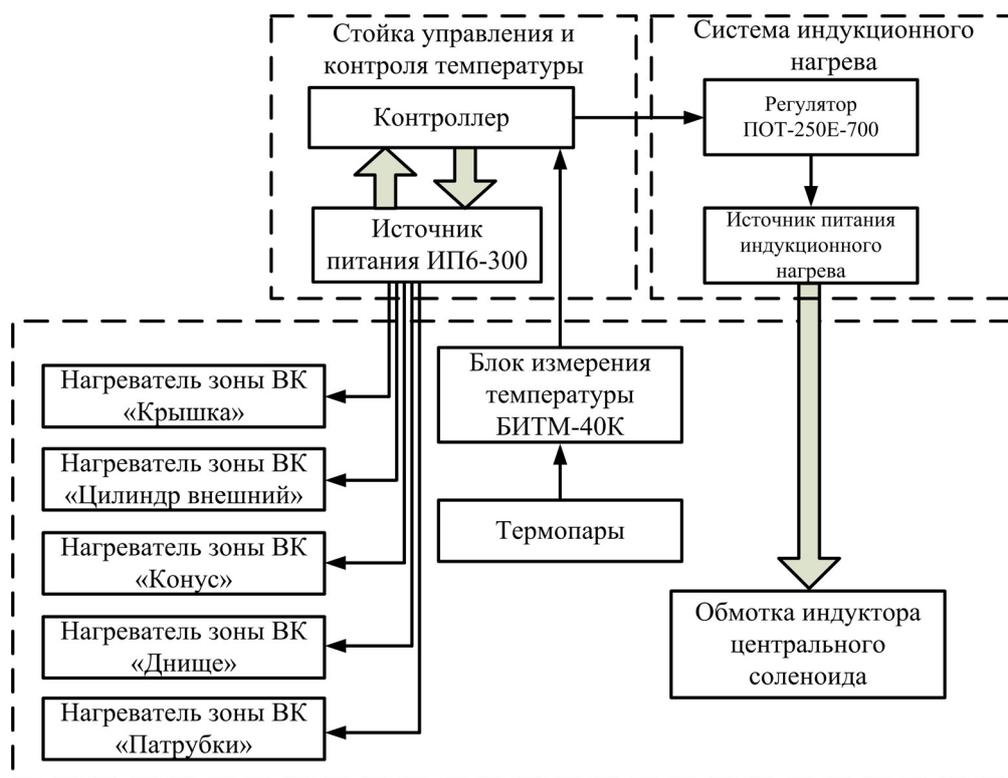


Рис. 1. Структурная схема подсистемы прогрева и контроля температуры

- рабочая камера, разделенная на 6 зон прогрева с нагревателями;
- источник питания ИП6–300;
- устройства индукционного нагрева.

Структурная схема подсистемы управления и контроля температуры представлена на рис. 1.

Мгновенные значения токов в ветвях источника питания регистрируются с помощью датчиков тока. Управление источником питания ИП6–300 осуществляется с использованием широтно-импульсной модуляции.

На основании структурных и принципиальных схем источников питания, описанных в техническом проекте на систему управления технологическими процессами и систему индукционного нагрева токамака КТМ, определяется состав параметров, регистрируемых в результате прямых измерений.

На основе анализа системы можно определить состав функций, обеспечивающих управление процессом прогрева камеры:

- измерение температуры в 39 точках;
- выполнение сбора и регистрации измеренных значений температуры в память контроллера с заданным периодом, цикл измерения не должен превышать 1 с;
- выработка на основе полученных данных о температуре сигналов управления на изменение состояния ключей в цепи нагревателей;
- контроль наличия тока в цепях нагревателей с целью обнаружения неисправностей в силовой части нагревателей;
- аварийная сигнализация при превышении температуры в зоне заданной величины и при отсутствии тока в цепях нагревателей.

В техническом проекте «Казахстанский материаловедческий проект. Технический проект. Пояснительная записка. Том 2. 1А.227.576 ТП» выполнен расчет и анализ электромагнитных нагрузок, действующих на вакуумную камеру установки. В расчетах учитывались электромагнитные нагрузки, обусловленные движением плазменного шнура и изменением тороидального тока плазмы. Расчеты напряженно-деформируемого состояния и устойчивости вакуумной камеры токамака КТМ при действии расчетных нагрузок (атмосфера, вес, электромагнитные нагрузки, температура) позволили сделать выводы о статической прочности и устойчивости вакуумной камеры при нормальных условиях эксплуатации. Было определено, что:

- максимальная разница температур по каждой отдельной зоне не должна превышать 40 °С в любой момент времени нагрева;
- разница средних температур между любыми зонами вакуумной камеры также не должна превышать 40 °С.

Для управления работой нагревателей разработаны сценарии прогрева, поддержания температуры и остывания вакуумной камеры.

1) Режим прогрева.

Управление работой нагревателей происходит по двум контурам: по каждой зоне нагрева и совместно по всем зонам.

а) Контур управления по каждой зоне.

В каждой из 6 зон вакуумной камеры выбираются по две термопары, с максимальной температурой оболочки вакуумной камеры в этой зоне  $T_{\max}$  и минимальной температурой  $T_{\min}$ .

На основе показаний термопар  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  производится расчет величины, необходимой для реализации алгоритма управления процессом нагрева оболочки вакуумной камеры: разница температур в данной зоне  $\Delta T_j$ , т. е.  $\Delta T_j = (T_{\max j} - T_{\min j})$ .

Управление нагревом в  $j$ -й зоне вакуумной камеры производится по значению величины  $\Delta T_j$  следующим образом. Если  $\Delta T_j < 40$  °С, то система управления вырабатывает сигнал  $C_{\text{упр } j}$  на подачу на нагреватель тока согласно пропорциональному закону регулирования  $C_{\text{упр } j} = K(T_{\text{уст}} - T_j)$ , где  $K$  – коэффициент пропорциональности регулятора, а  $T_{\text{уст}}$  – уставка по температуре (200 °С). Как только в процессе нагрева разница температур превышает

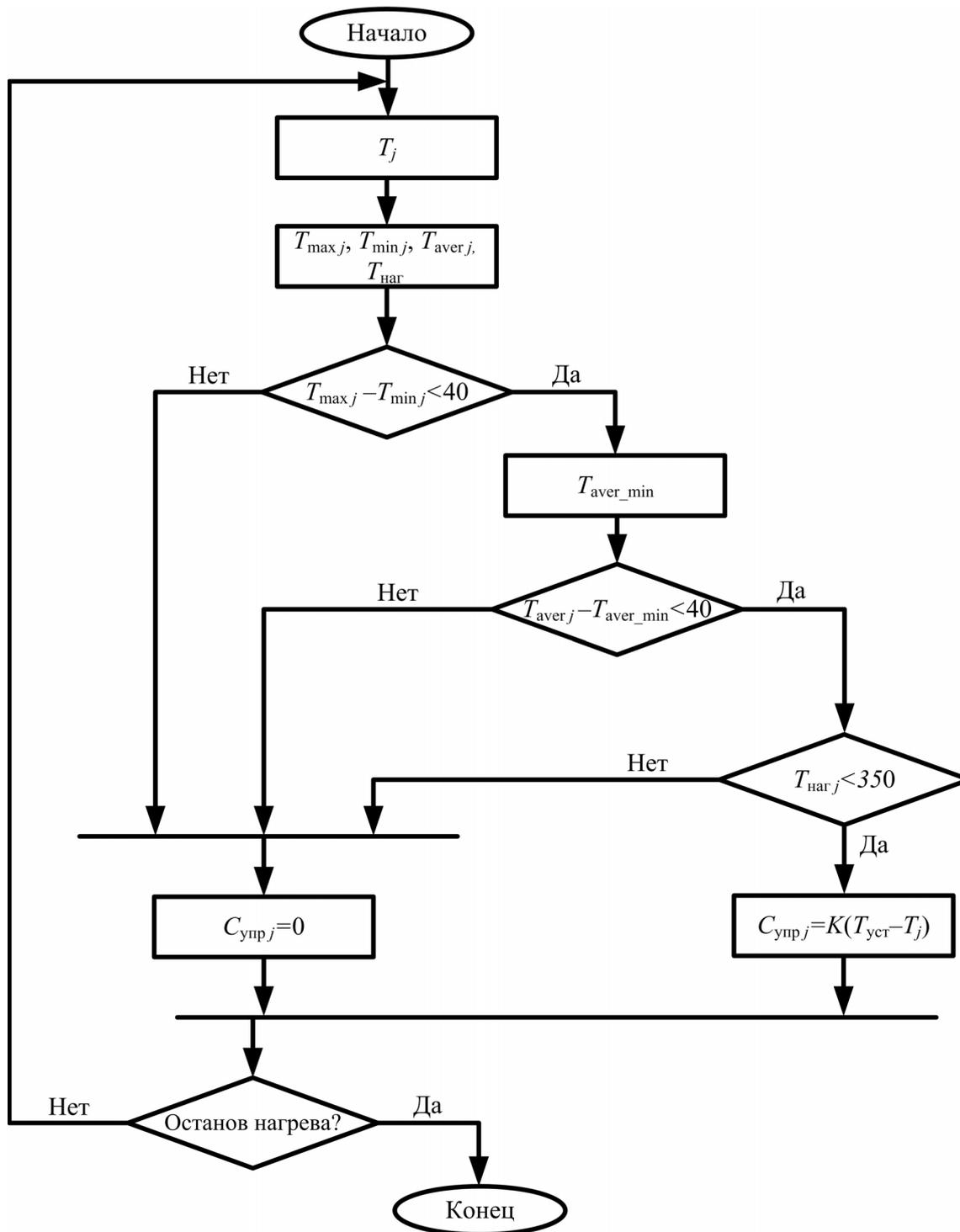


Рис. 2. Алгоритм управления нагревом

40 °С, т. е.  $\Delta T_j \geq 40$  °С, вырабатывается сигнал на отключение нагревателя. Пауза в нагреве данной зоны вакуумной камеры длится до тех пор, пока температуры в зоне не выровняются, т. е. не выполнится условие  $\Delta T_j < 40$  °С. Так постепенно происходит нагрев всех шести зон нагрева вакуумной камеры установки КТМ до требуемых 200 °С.

б) Контур управления совместно по зонам.

В процессе нагрева разные части (зоны) вакуумной камеры, имеющие различные «присоединенные» массы (дивертор, витки пассивной стабилизации и т. п.) будут нагреваться с различной скоростью. Для того чтобы разница температур между нагреваемыми зонами вакуумной камеры не превышала требуемые 40 °С, необходимо регулировать процесс нагрева путем ускорения нагрева «недогретых» зон вакуумной камеры и/или временного отключения подачи тока на нагреватель «перегретой» зоны.

Управление нагревом осуществляется на основании значения средней температуры каждой зоны, определяемой как  $T_{averj} = 0,5(T_{maxj} + T_{minj})$ . Из шести средних температурных зон выбирается зона вакуумной камеры с минимальной средней температурой  $T_{aver\_min}$ . Затем вычисляется разница между средней температурой каждой зоны и минимальной  $\Delta T_j = T_{averj} - T_{aver\_min}$ , по которой производится управление нагревом по следующей схеме:

- если  $\Delta T_j \geq 40$  °С, то вырабатывается сигнал  $C_{упрj}$  на отключение нагревателя зоны с тем, чтобы остановить рост средней температуры в данной  $j$ -й зоне вакуумной камеры и поддерживать температуру на постоянном уровне;
- если  $\Delta T_j < 40$  °С, то идет формирование сигнала  $C_{упрj}$  на подачу тока на нагреватель.

Алгоритм прогрева вакуумной камеры представлен на рис. 2.

2) Режим поддержания температуры на уровне 200 °С.

При достижении всеми зонами вакуумной камеры средней температуры 200 °С активная стадия нагрева оболочки вакуумной камеры переходит ко второму этапу – режиму поддержания температуры вакуумной камеры. Математически условие перехода к новому этапу может быть записано как  $T_{averj} \geq 200$  °С для всех шести зон. При выполнении этого условия система автоматического управления нагревателями вырабатывает сигнал на регулирование средней температуры по зоне  $j$ . Если средняя температура зоны превысит установленные 200 °С, т. е. если  $T_{averj} \geq 200$  °С, то система управления снимает токовую нагрузку с нагревателя

данной зоны. При понижении средней температуры зоны ниже 195 °С, т. е. при  $T_{averj} < 195$  °С, вырабатывается сигнал управления  $C_{упрj}$  на нагреватель  $j$ -й зоны.

По истечении определенного регламентом времени нахождения оболочки вакуумной камеры при температуре 200 °С наступает последний этап работы автоматической системы управления работой нагревателями.

3) Режим остывания.

При остывании вакуумной камеры необходимо в течение всего процесса удерживать разницу температур в 40 °С по всей оболочке вакуумной камеры. Управление остыванием осуществляется на основании значения средней температуры каждой зоны  $T_{averj} = 0,5(T_{maxj} + T_{minj})$ . Из шести средних температур  $T_{aver}$  выбирается зона вакуумной камеры с минимальной средней температурой  $T_{aver\_min}$ . Затем вычисляется разница между средней температурой каждой зоны и минимальной  $\Delta T_j = T_{averj} - T_{aver\_min}$ . При превышении разницы средних температур значения 40 °С, т. е. при выполнении условия  $\Delta T_j \geq 40$  °С, контроллер вырабатывает сигнал на включение нагревателя в зоне с минимальной средней температурой  $T_{aver\_min}$ . Как только температурная разница уменьшалась до  $\sim 38$  °С, т. е. при  $\Delta T_j \leq 38$  °С, вырабатывался сигнал на отключение нагревателя в зоне с минимальной средней температурой.

При достижении всеми зонами вакуумной камеры значения  $T_{averj} \leq (40 + 20)$  °С происходит полное отключение всей системы прогрева и поддержания температуры.

В дальнейшем будет произведен расчет оптимальных подводимых мощностей для каждой зоны в различные моменты времени, при которых достигается более равномерный нагрев и как следствие сокращение времени прогрева.

## Выводы

Разработаны алгоритмы управления процессом прогрева, поддержания температуры и остывания вакуумной камеры токамака КТМ. Испытания системы и алгоритма локального и группового управления контурами нагрева показали возможность проведения регулярных режимов прогрева как одного из этапов вакуумной подготовки камеры. При моделировании процесса прогрева показана неравномерность роста температуры в зонах, вследствие чего растет время прогрева вакуумной камеры до заданной температуры 200 °С.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов Э.А., Тажибаева И.Л. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы термоядерного синтеза. – Алматы: Изд-во НЯЦ РК, 2006. – 236 с.
2. Альхимович В.А., Вертипорох А.Н. и др. Изучение режимов прогрева вакуумной камеры установки Т-15. – М.: Изд-во ИАЭ им. Курчатова, 1990. – 25 с.
3. Павлов В.М., Мезенцев А.А., Бевзюк Е.Ю., Майструк Г.А. Си-

стемы управления процессом подготовки к эксперименту. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 146 с.

4. Земан С.К., Осипов А.В., Сахаров М.С. Исследование зависимостей характеристик резонансного контура от конструктивных и электрических параметров системы «индуктор – нагреваемый объект». – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 197–202.

Поступила 18.10.2010 г.