

Н.И. Жежера, В.В. Кравченко

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ ДОКРИТИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ ВОДЯНОГО ПАРА

Приводится вывод дифференциального уравнения редукционных установок водяного пара тепловых электростанций и котельных агрегатов, для которых скорости течения пара через регулирующие клапаны являются докритическими. Редукционные установки рассматриваются как объекты автоматизации при синтезе цифровых систем управления. Произведена линеаризация дифференциального уравнения, преобразование его к безразмерному виду и к операторному виду. Составлена структурная схема редукционных установок, используя типовые динамические звенья теории автоматического управления.

На тепловых электростанциях и котельных агрегатах используются редукционные установки различных типов и назначения, например, РУ1,2/0,8 МПа, РУ1,2/0,65 МПа, РУ1,2/0,8 МПа и другие. Редукционная установка РУ1,2/0,8 МПа предназначена для догрузки промышленного отбора водяного пара и обеспечения оптимальной работы турбины. Эта редукционная установка имеет производительность 30 тонн пара в час при начальных значениях давления пара, равного 1,2 МПа, и температуре пара 240° С. Давление редуцированного пара составляет 0,8 МПа.

Редукционные установки РУ1,2/0,65 МПа и РУ0,8/0,65 МПа предназначены для редуцирования водяного пара перед деаэраторами, работающими под давлением 0,6 МПа, тепловых электростанций, а также для редуцирования водяного пара на промышленных предприятиях. Производительность таких установок около 15 тонн в час.

Аналоговые системы управления, которыми снабжены редукционные установки водяного пара, переоборудуются в настоящее время на тепловых электростанциях и промышленных предприятиях на цифровые системы управления. Синтез цифровых систем управления технологическими процессами с использованием микропроцессорных устройств требует более подробного математического описания и анализа работы объектов автоматизации по сравнению с описанием объектов управления для аналоговых систем управления /1/. Это относится и к ре-

дукционным установкам пара тепловых электростанций и котельных агрегатов.

На рисунке 1 приведена схема редукционной установки водяного пара тепловых электростанций и автономных котельных агрегатов. Она содержит трубопровод 1 подвода к установке водяного пара, редукционный клапан 2, управление которым обычно осуществляется регулятором прямого или непрямого действия, камеру понижения (редуцирования) давления 3 до заданного значения, выходной вентиль или выходной регулируемый клапан 4 и выходной трубопровод 5. Выходной регулируемый клапан 4 конструктивно не входит в редукционные установки, однако в условиях работы тепловых электростанций или котельных установок, например, для подачи пара на деаэраторы, в качестве выходного вентиля 4 используется регулирующий клапан системы регулирования давления пара в головках деаэраторов или системы удаления кислорода из воды в деаэраторах путем барботирования паром.



Рисунок 1-Схема редукционной установки водяного пара тепловых электростанций и котельных агрегатов

Для теплоэнергетических приложений газовой динамики /2/ при течениях газов с достаточно большой скоростью через относительно короткие проточные части машин теплообмен между газовыми частицами не

успевает осуществляться в заметной степени, поэтому газодинамические расчеты могут строиться на основе предположения об адиабатности процесса. Отсюда вытекает, что при дросселировании водяного пара энтальпия не изменяется и температура до и после редуционного устройства остается постоянной.

Течение водяного пара через редуционное устройство, как и течение любого газа, может происходить с докритической или сверхкритической (дозвуковой или сверхзвуковой) скоростью и характеризуется коэффициентом β . Для адиабатного процесса и двухатомных газов коэффициент адиабаты $K=1,4$ и коэффициент β определяется по формуле

$$\beta = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K}{K-1}} = 0,528.$$

Для перегретого водяного пара $K=1,3$ и $\beta_n=0,546$. По значению коэффициента β_n определяют критическое давление водяного пара на входе редуционных установок.

$P_{кр} > \beta_n P_1$,
где P_1 -давление до редуционного клапана, Па;

$P_{кр}$ -критическое давление после редуционного клапана, Па.

Для рассматриваемых редуционных установок РУ1,2/0,8 МПа, РУ1,2/0,65 МПа и РУ0,8/0,65 МПа критические давления составляют соответственно 0,65; 0,65 и 0,44 МПа. Эти давления не больше давлений после редуционных клапанов, которые составляют соответственно 0,8; 0,65 и 0,65 МПа. На основании этих соотношений давлений скорости течения водяного пара через редуционный клапан 2 и регулируемый клапан 4 редуционных установок (рисунок 1) принимаются докритическими.

Уравнение динамики водяного пара в редуционной установке может быть представлено в следующем виде

$$V \frac{dp}{dt} = G_1 - G_2, \quad (1)$$

где V -объем водяного пара в камере понижения давления редуционной установки, м³;

ρ -плотность водяного пара, кг/м³;

t -время, с;

G_1 и G_2 -массовый расход водяного пара соответственно на входе в камеру пониже-

ния давления редуционной установки и на выходе из этой камеры, кг/с.

Для газообразных сред используют уравнение состояния /2/

$$P/\rho=RT, \quad (2)$$

где P -давление газообразной среды, Па;

R -газовая постоянная, м²с⁻² °К⁻¹;

T -абсолютная температура среды, °К.

После дифференцирования уравнение (2) по давлению P и плотности ρ

$$dP=RTd\rho, \quad (3)$$

и подстановки в уравнение (1) получим

$$\frac{V}{RT} \frac{dP}{dt} = G_1 - G_2. \quad (4)$$

Скорость течения водяного пара через редуционный и регулируемый клапаны 2 и 4 докритические. Для докритического течения газа (водяного пара) массовый расход определяется по формуле /3/

$$G_1 = \mu_1 F_1 \sqrt{\frac{2K}{K-1} \frac{P_1 P}{RT} \left[\left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right]}, \quad (5)$$

где μ_1 -коэффициент расхода;

F_1 -площадь проходного сечения редуционного клапана, м²;

K -коэффициент адиабаты перегретого водяного пара;

P_1 -давление водяного пара до и после редуционного клапана 2, Па.

Согласно /3/ уравнение (5) может быть преобразовано к виду

$$G_1 = \mu_1 F_1 K_a \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}}, \quad (6)$$

где K_a -коэффициент, определяемый по формуле

$$K_a = \sqrt{K \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}}}. \quad (7)$$

Для выходного регулируемого клапана уравнение расхода водяного пара аналогичное по форме уравнению (6), то есть

$$G_2 = \mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}}, \quad (8)$$

где μ_2 -коэффициент расхода выходного регулируемого клапана;

F_2 -площадь проходного сечения выходного регулируемого клапана, м².

Уравнение (4) с учетом соотношений (6) и (8) принимает вид

$$\frac{V}{RT} \frac{dP}{dt} = \mu_1 K_a F_1 \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}} - \mu_2 K_a F_2 \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}}. \quad (9)$$

Полученное уравнение (9) – это нелинейное уравнение, которое для дальнейшего анализа необходимо линеаризовать.

Переменными величинами в уравнении (9) являются F_1, F_2, P_1, P и P_2 . Установившиеся значения этих переменных величин обозначаем через $F_{10}, F_{20}, P_{10}, P_0$ и P_{20} . Соответствия между переменными величинами и их установившимися значениями имеют вид:

$$F_1 \rightarrow F_{10}; \quad F_2 \rightarrow F_{20}; \quad P_1 \rightarrow P_{10}; \quad P \rightarrow P_0; \quad P_2 \rightarrow P_{20}. \quad (10)$$

Координаты переменных величин, выражаются через приращения и установившиеся значения следующими соотношениями:

$$F_1 = F_{10} + \Delta F_1; \quad F_2 = F_{20} + \Delta F_2; \quad P_1 = P_{10} + \Delta P_1; \\ P = P_0 + \Delta P; \quad P_2 = P_{20} + \Delta P_2. \quad (11)$$

При линеаризации соотношения (9) вначале разлагают его в ряд Тейлора, пренебрегая величинами второго порядка малости, а затем вместо всех переменных параметров делают подстановку их установившихся значений из соотношений (10). В результате таких действий получим линеаризованное уравнение

$$\begin{aligned} \frac{V}{RT} \frac{dP}{dt} = & \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} + \mu_1 K_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} \Delta F_1 + \\ & + \mu_1 K_a F_{10} \frac{1}{2} \frac{(2P_{10} - P_0)}{RT \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}}} \Delta P_1 + \\ & + \mu_1 K_a F_{10} \frac{1}{2} \frac{(-P_{10})}{RT \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}}} \Delta P - \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} - \\ & - \mu_2 K_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} \Delta F_2 - \\ & - \mu_2 K_a F_{20} \frac{1}{2} \frac{(2P_0 - P_{20})}{RT \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}}} \Delta P - \mu_2 K_a F_{20} \frac{1}{2} \frac{(-P_0)}{RT \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}}} \Delta P_2, \end{aligned}$$

которое после некоторых упрощений принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{V}{RT} \frac{dP}{dt} = & \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} + \mu_1 K_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} \Delta F_1 + \\ & + \mu_1 K_a F_{10} \frac{(2P_{10} - P_0)}{2\sqrt{RT P_{10}(P_{10} - P_0)}} \Delta P_1 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \mu_1 K_a F_{10} \frac{P_{10}}{2\sqrt{RT P_{10}(P_{10} - P_0)}} \Delta P - \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} - \\ - \mu_2 K_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} \Delta F_2 - \\ - \mu_2 K_a F_{20} \frac{(2P_0 - P_{20})}{2\sqrt{RT P_0(P_0 - P_{20})}} \Delta P + \mu_2 K_a F_{20} \frac{P_0}{2\sqrt{RT P_0(P_0 - P_{20})}} \Delta P_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Для установившегося течения водяного пара уравнение (9) при значениях соотношений (10) принимает вид

$$\frac{V}{RT} \frac{dP_0}{dt} = \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} - \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} = 0. \quad (13)$$

Это соотношение равно нулю потому, что производная от постоянной величины $dP_0/dt = 0$. Уравнение (13) позволяет определить установившийся расход водяного пара через оба клапана редукционной установки, а именно:

$$G_0 = \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} = \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}}. \quad (14)$$

Вычитая из уравнения (12) уравнение (13), и поделив обе части полученного соотношения на установившийся расход G_0 , получим

$$\begin{aligned} \frac{V}{RT G_0} \frac{dP}{dt} = & \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + \frac{(2P_{10} - P_0)}{2P_{10}(P_{10} - P_0)} \Delta P_1 - \frac{P_{10}}{2P_{10}(P_{10} - P_0)} \Delta P - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \\ & - \frac{(2P_0 - P_{20})}{2P_0(P_0 - P_{20})} \Delta P + \frac{1}{2(P_0 - P_{20})} \Delta P_2. \end{aligned}$$

После упрощения это уравнение принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{V}{G_0 RT} \frac{dP}{dt} + \frac{2P_0 P_{10} - P_{10} P_{20} - P_0^2}{2P_0(P_{10} - P_0)(P_0 - P_{20})} \Delta P = & \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \frac{(2P_{10} - P_0)}{2P_{10}(P_{10} - P_0)} \Delta P_1 + \\ & + \frac{1}{2(P_0 - P_{20})} \Delta P_2. \end{aligned} \quad (15)$$

Перепишем уравнение (15) таким образом, чтобы были отношения $\Delta P/P_0$; $\Delta P_1/P_{10}$ и $\Delta P_2/P_{20}$

$$\frac{V \cdot P_0}{G_0 RT} \frac{d\left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)}{dt} + \frac{P_{10}(2P_0 - P_{20}) - P_0^2}{2(P_{10} - P_0)(P_0 - P_{20})} \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \frac{(2P_{10} - P_0) \Delta P_1}{2(P_{10} - P_0) P_{10}} + \frac{P_{20} \Delta P_2}{2(P_0 - P_{20}) P_{20}} \quad (16)$$

Введем в уравнении (16) следующие обозначения:

$$\frac{VP_0}{G_0 RT} = T_a; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = x(t); \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = a(t); \quad \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = b(t);$$

$$\frac{\Delta P_1}{P_{10}} = c(t); \quad \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = d(t); \quad \frac{P_{10}(2P_0 - P_{20}) - P_0^2}{2(P_{10} - P_0)(P_0 - P_{20})} = K_1;$$

$$\frac{(2P_{10} - P_0)}{2(P_{10} - P_0)} = K_2; \quad \frac{P_{20}}{2(P_0 - P_{20})} = K_3. \quad (17)$$

С учетом соотношений (17) уравнение (16) принимает вид

$$T_a \frac{dx}{dt} + K_1 x(t) = a(t) - b(t) + K_2 c(t) + K_3 d(t). \quad (18)$$

После преобразования по Лапласу получим

$$(T_a S + K_1) \cdot x(s) = a(s) - b(s) + K_2 c(s) + K_3 d(s), \quad (19)$$

где s-оператор Лапласа.

На рисунке 2 представлена структурная схема редуцированной установки водяного пара, составленная по уравнению (19) с использованием типовых динамических звеньев теории автоматического управления. По этой схеме по каждому входному сигналу

(каналу) можно определить передаточную функцию.

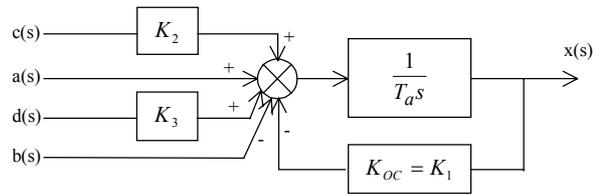


Рисунок 2- Структурная схема редуцированной установки водяного пара

Полученные уравнения (18) и (19) позволяют провести анализ влияния различных параметров редуцированной установки на постоянную времени T_1 и коэффициенты K_1, K_2 и K_3 , а также эффективно синтезировать цифровую систему управления редуцированной установкой.

Выводы

Предложено математическое описание редуцированных установок тепловых электростанций и котельных агрегатов при докритическом течении водяного пара через редуцированные клапаны, рассматривая редуцированные установки как объекты автоматизации при синтезе цифровых систем управления. Произведена линеаризация дифференциального уравнения, преобразование его к безразмерному виду и к операторному виду. Составлена структурная схема редуцированных установок, используя типовые динамические звенья теории автоматического управления.

Список использованной литературы

1. Изерман Р. Цифровые системы управления. Перевод с английского. М.: Мир, 1984. 541 с.
2. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1987. 440с.
3. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М.: Машиностроение, 1978. 736 с.

Статья поступила в редакцию 03. 04. 2000г.