

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА ЗА ЗАГРЯВАНЕ НА ВОДА И ОТОПЛЕНИЕ AUTOMATIC HOT WATER SYSTEM AND HEATING OF A BUILDING

Dimitar Spirov

University of Food Technologies – Plovdiv

Nikolay Komitov

University of Food Technologies – Plovdiv

Abstract

A hot water system and heating of a building was studied. The system contains a bio-fuel tank, boiler and radiators. The electro-thermal analogy was used in the modelling of the system and an electrical equivalent scheme was obtained based on the generalized heat model and the identification of the thermal parameters. An automatic water temperature control system with PI regulator has been developed. Simulation results for the water temperature and the thermal capacity in the leakage of water from the boiler was obtained.

Keywords: hot water system; electro-thermal analogy; automatic control system.

ВЪВЕДЕНИЕ

Нарастващото търсене на котли с биогориво за битово отопление е обосновано от тяхната висока ефективност достигаща 90 %, ниското количество на вредни емисии получени при работата им, лесното обслужване [1, 2]. Като биогориво могат да бъдат използвани дървесни пелети, дървесен чипс, сено, отпадъчни селскостопански продукти.

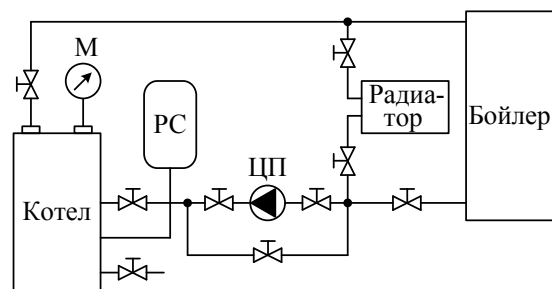
В литература [1] е направено изследване на комбинирани системи включващи различни енергийни източници като биогориво, слънце, електричество. За управление на котела е използван двупозиционен регулатор.

В литература [3] е проектирана система с котел на биомаса, два топлообменника и регулатор на Смит. Направено е сравнение със система управлявана чрез затворен контур и ПИД регулатор.

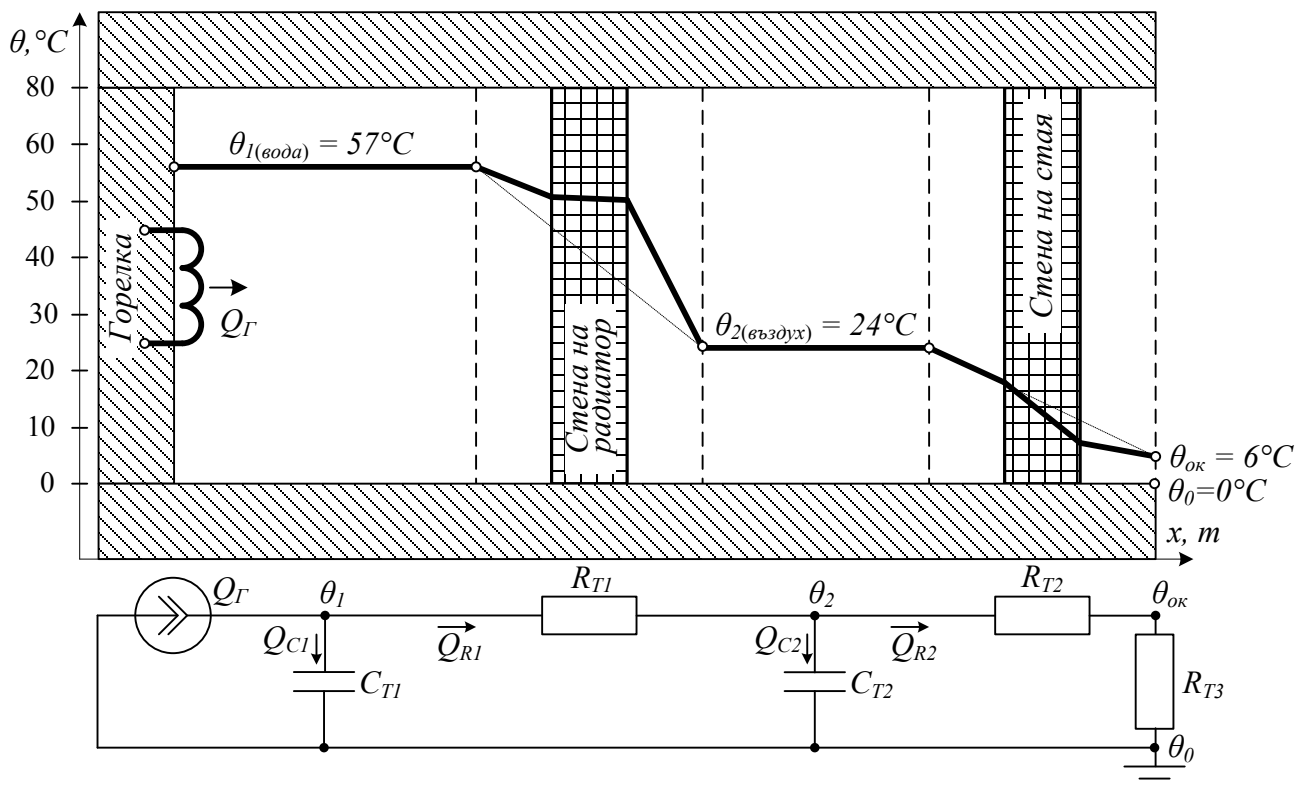
Целта на настоящото изследване е да се разработи математически модел на система с котел на биомаса, който да бъде сравнен с реално изградена система.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Схема на съществуваща инсталация е представена на фигура 1. Котелът на биомаса е с автоматично зареждане на горивото с капацитет 4.10^4 kcal/h и воден обем 80 литра. В целия обем се поддържа еднаква температура на водата посредством циркуляционна помпа (ЦП). От изходната тръба на котела загрята вода постъпва към консуматорите - радиатори и 300 литров бойлер, свързани паралелно (на фигурата е показан само един от радиаторите). На входа и изхода на котела, радиаторите, бойлера и циркуляционната помпа са поставени спирателни кранове. Използван е разширителен съд (РС) с вместимост 100 литра. Към котела е монтиран манометър (М) за измерване на температурата.



Фиг. 1. Схема на съществуващата инсталация



Фиг. 2. Обобщен модел на системата

На фиг. 2 е даден топлинен модел на системата. При анализа на процесите е използвана електро-топлинната аналогия (Таблица 1). На същата фигура е дадена и електрическата заместваща схема, отразяваща аналогичните топлинни процеси.

Таблица 1. Електро-топлинна аналогия

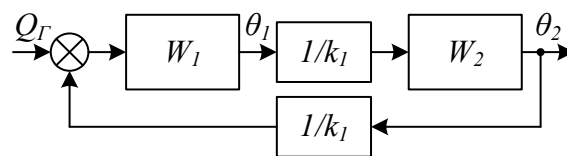
Топлинен параметър	Електрически параметър
Топлинен поток (Топлинна мощност) – Q , [W]	Електрически ток – I , [A]
Температура – θ , [°C]	Електрически потенциал – φ , [V]
Температурна разлика – $\Delta\theta$, [°C]	Електрическо напрежение – U , [V]
Топлинно съпротивление – R_T , [K/W]	Електрическо съпротивление – R , [Ω]
Топлинен капацитет – C_T , [J/K]	Електрически капацитет – C , [F]

За двата възела на заместващата схема (фиг. 2) можем да запишем:

$$\begin{aligned} Q_G &= Q_{R1} + Q_{C1}; \\ Q_{R1} &= Q_{R2} + Q_{C2}, \end{aligned} \quad (1)$$

където: $Q_{R1} = R_{T1}(\theta_1 - \theta_2)$; $Q_{R2} = (R_{T2} + R_{T3})\theta_2$; $Q_{C1} = C_{T1}d\theta_1/dt$; $Q_{C2} = C_{T2}d\theta_2/dt$.

На база на системата диференциални уравнения, описващи процесите в разглежданата инсталация, получена от система (1) [4] е съставена структурната схема, дадена на фиг. 3.



Фиг. 3. Структурна схема на обекта за управление

Предавателните функции W_1 и W_2 на звената са:

$$W_1 = \frac{k_1}{T_1s + 1}; \quad W_2 = \frac{k_2}{T_2s + 1}, \quad (2)$$

където: $k_1 = R_{T1}$; $k_2 = R_{T1}R_{T23}/(R_{T1} + R_{T23})$; $R_{T23} = R_{T2} + R_{T3}$; $T_1 = k_1C_{T1}$; $T_2 = k_2C_2$; R_{T1} , R_{T2} , R_{T3} – топлинни съпротивления съответно на стена на радиатора, на стена на стаята и на околната среда; C_{T1} , C_{T2} – топлинни капацитети съответно на водния обем и на въздушния обем в системата.

Едноконтурно управление

Еквивалентната предавателна функция се получава:

$$W_O = \frac{W_1 W_2 / k_1}{1 - W_1 W_2 / k_1^2} = \frac{k_2}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + (1 - k_2 / k_1)} \quad (3)$$

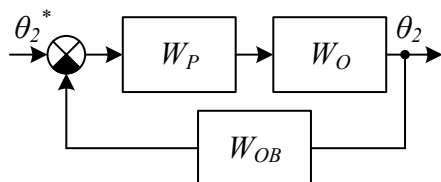
Разделяме двете страни на уравнението на $(1 - k_2/k_1)$ за да го приведем в стандартна форма. Предавателната функция на обекта, получена от уравненията на Ойлер [4] е:

$$W_O = \frac{k_e}{(T_{e1}s + 1)(T_{e2}s + 1)}, \quad (4)$$

където: $T_{e1} = -1/s_1$; $T_{e2} = -1/s_2$; $s_{1,2} = [-a_1 \pm (a_1^2 - 4a_2)^{1/2}]/(2a_2)$; $a_2 = T_1 T_2 / (1 - k_2/k_1)$; $a_1 = (T_1 + T_2) / (1 - k_2/k_1)$; $a_0 = 1$; $k_e = k_2 / (1 - k_2/k_1)$.

Автоматично управление на температурата на въздуха в помещението

На фиг. 4 е дадена структурната схема на затворена система за управление с ПИ регулатор.



Фиг. 4. Структурна схема на затворената система за управление

Предавателната функция на затворената система се получава:

$$W_3 = \frac{W_P W_O}{1 + W_P W_O W_{OB}}, \quad (5)$$

където: $W_P = k_S(T_S s + 1)/(T_S s)$; k_S и T_S са съответно коефициента на пропорционалност и времеконстантата на ПИ регулатора; $W_{OB} = 1$. Приемаме $T_S = T_{e2}$ и за W_3 получаваме [4]:

$$W_3 = \frac{1}{\frac{T_S T_{e1}}{k_S k_e} s^2 + \frac{T_S}{k_S k_e} s + 1} = \frac{1}{T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1} \quad (6)$$

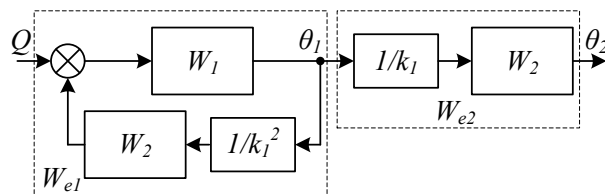
където T_0 и ξ са съответно времеконстантата и коефициент на затихване на колебателното звено [5].

Приравняваме коефициентите пред различните степени на оператора s и от получената система уравнения изразяваме T_0 и k_S . За k_S се получава:

$$k_S = \frac{T_S}{4\xi^2 k_e T_{e1}} \quad (7)$$

Двуконтурно управление

Еквивалентната предавателна функция на едноконтурното управление не дава възможност да се отчита и регулира температурата на водата в системата, което може да доведе до превишаване на допустимите стойности. Поради тази причина се въвежда двуконтурното управление, при което се обособяват две независими системи: на водния обем и на въздушния обем. За тази цел се пренася възела на изходната схема през двете звена. Получената схема е дадена на фиг. 5.



Фиг. 5. Структурна схема на обекта за управление

За еквивалентната предавателна функция W_{e1} се получава:

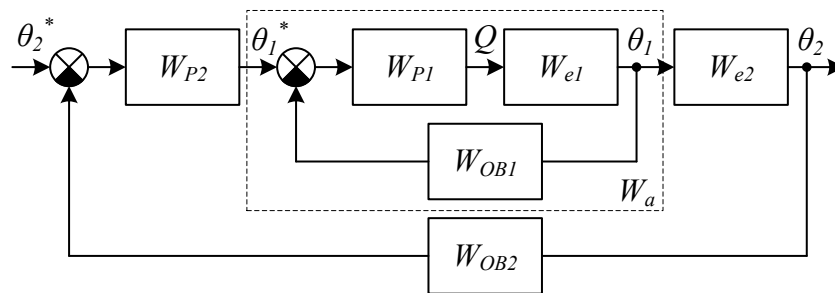
$$W_{e1} = \frac{W_1}{1 - W_1 W_2 / k_1^2} = \frac{k_1}{1 - k_2 / k_1} (T_2 s + 1) = \frac{T_1 T_2}{1 - k_2 / k} s^2 + \frac{T_1 + T_2}{1 - k_2 / k} s + 1 \quad (8)$$

Предавателната функция на звеното, получена от уравнения на Ойлер [4] е:

$$W_{e1} = \frac{k_{e1}(T_{2s} + 1)}{(T_{e1}s + 1)(T_{e2}s + 1)}, \quad (9)$$

където T_{e1} и T_{e2} са определени както в израз (4), а $k_{e1} = k_1/(1 - k_2/k_1)$. За еквивалентната предавателна функция W_{e2} се получава:

$$W_{e2} = \frac{k_2/k_1}{T_2s + 1}. \quad (10)$$



Фиг. 6. Структурна схема на затворената система за двуконтурно управление

$$W_a = \frac{W_{P1}W_{e1}}{1 + W_{P1}W_{e1}W_{OB1}}, \quad (11)$$

където: $W_{P1} = k_{S1}(T_{S1}s + 1)/(T_{S1}s)$; k_{S1} и T_{S1} са съответно коефициента на пропорционалност и времеконстантата на ПИ регулатора; $W_{OB1} = 1$. Приемаме $T_{S1} = T_{e2}$ [4] и за W_a получаваме:

$$W_a = \frac{T_2s + 1}{\frac{T_{S1}T_{e1}}{k_{S1}k_{e1}}s^2 + \frac{T_{S1} + k_{S1}k_{e1}T_2}{k_{S1}k_{e1}}s + 1} = \frac{T_2s + 1}{T_0^2s^2 + 2\xi T_0s + 1}. \quad (12)$$

Приравняваме коефициентите пред различните степени на оператора s и от получената система уравнения изразяваме T_0 и ξ . За оптималната настройка на регулатора определяме $d\xi/dk_{S1} = 0$ [5], от където за k_{S1} получаваме:

$$k_{S1} = \frac{T_{S1}}{k_{e1}T_2}. \quad (13)$$

Настройка на регулаторите

На фиг. 6 е дадена структурната схема на затворена система с външен контур за управление на температурата на въздуха и подчинен контур за управление на температурата на водата.

Настройка на вътрешния контур за управление с ПИ регулатор

Предавателната функция на затворената система се получава:

Еквивалентната предавателна функция се получава във вида:

$$W_a = \frac{T_2s + 1}{(T_{a1}s + 1)(T_{a2}s + 1)}, \quad (14)$$

където: $T_{a1} = -1/s_1$; $T_{a2} = -1/s_2$; $s_{1,2} = [-a_1 \pm (a_1^2 - 4a_2)^{1/2}]/(2a_2)$; $a_2 = T_0^2 = T_{S1}T_{e1}/(k_{S1}k_{e1})$; $a_1 = 2\xi T_0 = (T_{S1} + k_{S1}k_{e1}T_2)/(k_{S1}k_{e1})$; $a_0 = 1$.

Настройка на външния контур за управление с ПИ регулатор

Предавателната функция на затворената система се получава:

$$W_b = \frac{W_{P2}W_aW_{e2}}{1 + W_{P2}W_aW_{e2}W_{OB2}}, \quad (15)$$

където: $W_{P2} = k_{S2}(T_{S2}s + 1)/(T_{S2}s)$; k_{S2} и T_{S2} са съответно коефициента на пропорционалност и времеконстантата на ПИ регулатора; $W_{OB2} = 1$. Приемаме $T_{S2} = T_{a2}$ [4] и за W_b получаваме:

$$W_b = \frac{1}{\frac{k_1 T_{S2} T_{a1}}{k_{S2} k_2} s^2 + \frac{k_1 T_{S2}}{k_{S2} k_2} s + 1} = \frac{1}{T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1} \quad (16)$$

Приравняваме коефициентите пред различните степени на оператора s и от получената система уравнения изразяваме T_0 и k_{S2} . За k_{S2} се получава:

$$k_{S2} = \frac{k_1 T_{S2}}{4\xi^2 k_2 T_{a1}} \quad (17)$$

ПОЛУЧЕНИ РЕЗУЛТАТИ

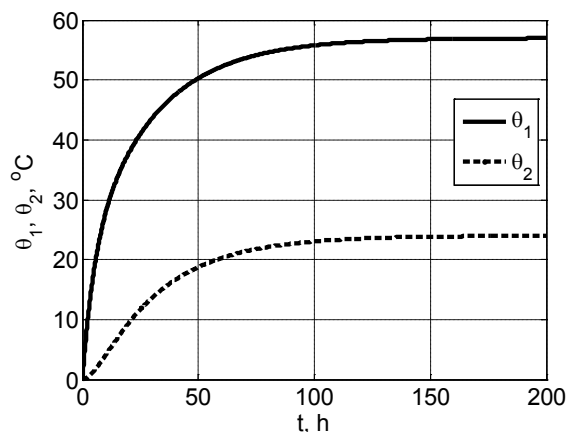
Разработената методика за автоматично управление на инсталацията за централно отопление и подгриване на вода за битови нужди е изследвана симулационно. В таблица 2 са систематизирани резултатите от аналитичното определяне на параметрите на елементите в системата.

Таблица 2. Параметри на елементите в системата

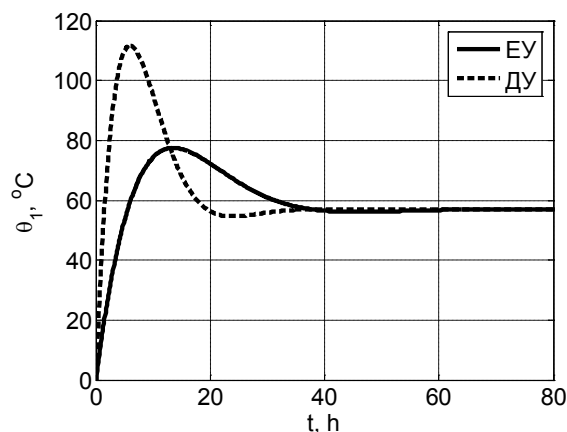
Параметър		Стойност
$Q_{ГН}$	kW	3
θ_{1H}	°C	57
θ_{2H}	°C	24
$\theta_{окH}$	°C	6
θ_0	°C	0
R_{T1}	°C/W	0,011
R_{T2}	°C/W	0,006
R_{T3}	°C/W	0,002
C_{T1}	MJ/°C	2,1
C_{T2}	MJ/°C	10,5
T_1	h	6,42
T_2	h	13,51
T_{e1}	h	5,11
T_{e2}	h	29,31

На фиг. 7 са представени характеристиките на температурата на водата θ_1 и температурата на въздуха θ_2 при подаване на постоянен топлинен поток от горелката $Q_{ГН} = 3\text{kW}$.

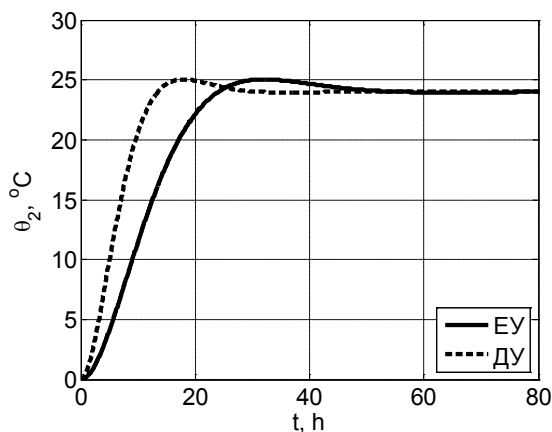
На фиг. 8, фиг. 9, фиг. 10 са представени характеристиките на величините при едноконтурно управление (ЕУ) и при двуконтурно управление (ДУ).



Фиг. 7. Зависимости на $\theta_1, \theta_2 = f(t)$



Фиг. 8. Зависимости на $\theta_1, = f(t)$



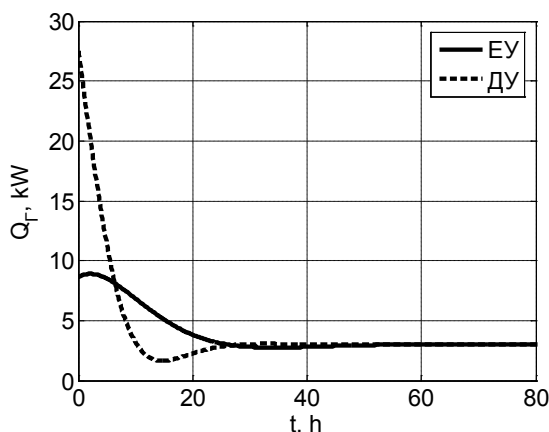
Фиг. 9. Зависимости на $\theta_2, = f(t)$

В таблица 3 са представени резултатите за максималната стойност на температурата на водата θ_{1max} ; максималната стойност на температурата на въздуха θ_{2max} ; максималната стойност на топлиния поток на горелката $Q_{Гmax}$, както и времето за достигане на установена температура t_y при отклонение $\delta = \pm 2\%$ [5] и времето за достигане на зададената стойност на температурата t_3 при едноконтурно и двуконтурно управление. В

същата таблица са дадени и стойностите на величините при ограничение на температурата на водата $\theta_{1max} = 80^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3. Резултати от изчисленията

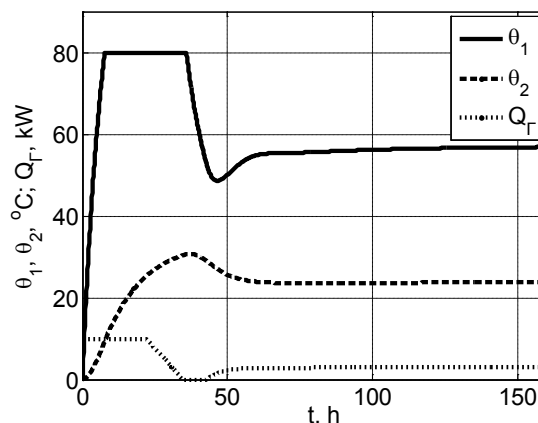
Режим	ОС	ЕУ	ДУ	ДУО
$\theta_{1max}, ^{\circ}\text{C}$	57	77,5	111,6	80
$\theta_{2max}, ^{\circ}\text{C}$	24	25,04	25,04	30,78
$Q_{Гmax}, \text{kW}$	3	8,9	27,54	10
t_y, h	118,5	43,6	24,38	90,64
t_3, h	118,5	22,7	12,66	19,51



Фиг. 10. Зависимости на $Q_G = f(t)$

От таблицата се вижда, че при избраната стойност на $\zeta = 0,707$, която съответства на преходен процес с пререгулиране на изходната величина 4,33 % [4, 5] както при едноконтурното, така и при двуконтурното управление температурата на въздуха в помещението θ_1 достига зададената температура за съответно 22,7h и 12,66h. При двуконтурното управление зададената температура се достига за почти два пъти по-малко време, но това е свързано с повишаване на пиковата стойност на топлинния поток от горелката до 27,54kW, което води до повишаване на пиковата стойност на температурата на водата в системата до 111,6°C. За да се ограничат тези стойности към регулатора на водата е добавен ограничител със стойност $\theta_{10Г} = 80^{\circ}\text{C}$, а изхода на горелката е ограничен до 10 kW [3]. В последната колона на таблицата са дадени параметрите при този режим (ДУО). От нея се вижда, че с въвеждането на ограничителите се увеличава повече от три пъти времето за установяване на температурата на въздуха в системата и повече от 1,2 пъти нейната пикова стойност (фиг. 11). В първата колона на та-

блицата са дадени параметрите при отворена система на управление (ОС).



Фиг. 11. Зависимости на $\theta_1, \theta_2, Q_G = f(t)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработена и изследвана е система с едноконтурно и двуконтурно регулиране за топла вода на база съществуваща система за отопление. При разработването на модела е използвана електро-топлинната аналогия за определянето на стойностите на елементите в двата контура на системата. Въвеждането на подчинен контур на управление на температурата на водата в системата води както до увеличаване на бързодействието, така и увеличаване на максималните стойности температурата и на топлинния поток.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fiedler F., Combined solar and pellet heating systems, Mälardalen University, 2006.
- [2] Verma V. K., Bram S., De Ruyck J., Small scale biomass heating systems: standards, quality labelling and market driving factors – an EU outlook Biomass and Bioenergy, 2009, 33, pp. 1393–1402.
- [3] Máša V., Pavlas M., Švarc I., Mathematical model of biomass boiler for control purposes, Chemical Engineering Transactions, 2011, 25, pp. 743-748.
- [4] Krishnan R. Electric motor drives. Modeling, analysis, and control. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 2001.
- [5] Dragotinov I., Ganchev I., Automation of technological processes, Academic Publishing of UFT – Plovdiv, 2000.