

Математически модел на динамиката на параметри в компенсатора на налягане на реактор ВВЕР-1000

Костадин Петков, Александър Григоров

Резюме: В доклада е представен математически модел на динамиката на налягането и нивото в компенсатора на налягане за реактор ВВЕР-1000.

Моделът е създаден чрез аналитическия подход – прилагане на законите за съхранение на енергията и масата в компенсатора на налягане.

Решаването на системата уравнения, описващи динамиката на налягането и нивото, е направено числено. В резултат са получени преходни характеристики по основните динамични канали. Създаденият модел ще бъде използван за изследване поведението на управляващи алгоритми за управление на налягането и нивото в компенсатора на налягане на реактор ВВЕР-1000.

Mathematical model of the parameter dynamics of the pressurizer of reactor VVER-1000

Kostadin Petkov, Alexander Grigorov

Abstract: In the paper is presented a mathematical model of the dynamics of pressure and level in the pressurizer for nuclear reactor VVER-1000. The model is developed by using of the analytic approach - application of the laws of energy and the mass preservation in the pressurizer.

The solving of the equations system, describing the dynamics of pressure and level, is done numerically. As a result it is obtained the step responses of the main dynamic channels. The created model will be used to study the behavior of the control algorithms for control of the pressure and level in the pressurizer of the reactor VVER-1000.

Въведение

За да се поддържа налягането на водата в първи контур на ВВЕР в определени граници при нормални, преходни и аварийни режими, е необходимо да се компенсират по подходящ начин обемните разширения на водата дължащи се на изменението на средната температура на топлоносителя. Тази задача се изпълнява от системата за създаване и регулиране на налягането. При циркулиране на вода в затворен кръг без фазова промяна (кипене) повишено налягане може да се създаде само с външен източник, тъй като движещият напор на циркуляционната помпа преодолява само хидравличните съпротивления в кръга.

Системата за компенсиране на налягането в I контур на реактори ВВЕР се състои от:

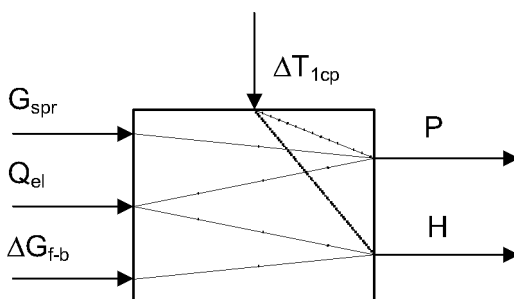
- Компенсатор на налягане (КН);
- Тръбни електронагреватели (ТЕН);
- Барботажен резервоар (ББ);
- Импулсни предпазни устройства (ИПУ).

1. Компенсатор на налягането – особености при моделирането

Особеностите при моделирането на работата на компенсатора на налягането (КН) се заключват в това, че в различните режими на работа пара и вода могат да се намират както в равновесно така и в неравновесно състояние. В установен режим на работа пара и вода се намират в равновесно състояние, т.е температурата в указаната среда е еднаква и съответства на значението ѝ на линията на насищане.

При неустановени режими на работа, когато топлоносителя постъпва в КН, настъпва неравновесен режим, при който за сметка на работата на електрическите нагреватели водата постепенно се нагрива и достига температура на насищане. От това следва, че при различни режими на работа могат да се разглеждат четири комбинации от състояния на пара и вода: прегрята пара – вода в състояние на насищане, прегрята вода – вода в подоохладено състояние, наситена пара – вода в състояние на насищане, наситена пара – вода в състояние на насищане [2].

Целта при създаването на модела е да се изведат уравнения описващи динамиката на основните регулируеми параметри, които са ниво и налягане в КН. Въз основа на знанията за протичащите технологични процеси в системата, в която е включен КН, обекта може да се ограничи между точките на прилагане на входните въздействия – управляващи и смущаващи, и получаване на изходните параметри, характеризиращи състоянието на технологичния процес. Това позволява представяне на обекта като параметрично – информационна структура фиг. 1.



Фиг. 1 Параметрично-информационна схема на КН

Основното смущение за системата се явява средната температура на топлоносителя в първи контур (ΔT_{cp}). Регулиращите въздействия са: разхода на вода за впръск (G_{spr}), топлинната мощност на ТЕН (Q_{el}) и баланса на водата за подхранване и продухване на първи контур (ΔG_{f-b}).

2. Аналитичен модел на динамиката на налягането и нивото

Математическият модел представлява затворена система уравнения, функции и съотношения, отразяващи връзките между входните и изходните параметри на процеса. Аналитичните модели се създават чрез съставяне на уравнения, основаващи се на законите за съхранение на масата, енергията, количеството на движение и други физични закони.

Извеждането на математическия модел на компенсатора се основава на уравненията за масов и енергиен баланс на водната и парна фази, намиращи се в състояние на насищане. Приема се, че КН е обект със съсредоточени параметри, респ. водната и парна част се разглеждат като съсредоточени обеми и налягането в целия обем на КН е еднакво.

Уравненията за масов и енергиен баланс на водната фаза в състояние на насищане са:

$$\frac{dm_w}{dt} = \frac{d(\rho_w V_w)}{dt} = G_i + G_c - G_e \tag{1}$$

$$\frac{d(\rho_w \cdot V_w \cdot h_w)}{dt} = Q_{el} + G_i \cdot h_i + G_c \cdot h_w - G_e \cdot h_s, \tag{2}$$

където:

- m_w [kg] – акумулирана маса вода във водната част на КН;
- ρ_w [kg/m³] – плътност на вода при работни параметри в КН;
- V_w [m³] – обем на вода в КН ;
- G_i [kg/s] – дебит на вода от първи контур, постъпваща в КН;

- G_c [kg/s] – разход на частта от парната фаза която кондензира;
- Q_{el} [kW] – мощност на включените тръбни електронагреватели;
- G_e [kg/s] – разход на частта от водната фаза която се изпарява;
- h_w [kJ/kg] – енталпия на водата при работни параметри в КН;
- h_s [kJ/kg] – енталпия на парата при работни параметри в КН;
- h_i [kJ/kg] – енталпия на водата постъпваща в КН;
- P [MPa] – налягане в КН.

Уравненията за масов и енергиен баланс на парната фаза в състояние на насищане имат вида:

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{d(\rho_s \cdot V_s)}{dt} = G_e + G_{spr} - G_c \quad (3)$$

$$\frac{d(\rho_s \cdot V_s \cdot h_s)}{dt} = G_e \cdot h_s + G_{spr} \cdot h_{spr} - G_c \cdot h_w, \quad (4)$$

където:

- m_s [kg] – акумулирана маса пара в парното пространство на КН;
- ρ_s [kg/m³] – плътност на пара;
- V_s [m³] – обем на парното пространство в КН ;
- G_{spr} [kg/s] – разход на вода постъпваща в КН от впръска в парното пространство на КН;
- h_{spr} [kJ/kg] – енталпия на впръска;

2.1 Модел на динамиката на налягането

След сумиране на уравненията за масов баланс на водната (1) и парна (3) фаза се получава:

$$\rho_w \frac{dV_w}{dt} + V_w \frac{\partial \rho_w}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \rho_s \frac{dV_s}{dt} + V_s \frac{\partial \rho_s}{\partial P} \frac{dP}{dt} = G_i + G_{spr} \quad (5)$$

Отчитайки, че

$$\frac{dV_s}{dt} = -\frac{dV_w}{dt}, \quad (6)$$

уравнение (5) може да се запише във вида:

$$K_{M1} \frac{dP}{dt} + K_{M2} \frac{dV_w}{dt} = G_i + G_{spr}, \quad (7)$$

в което:

$$K_{M1} = V_w \frac{\partial \rho_w}{\partial P} + V_s \frac{\partial \rho_s}{\partial P} \quad (8)$$

$$K_{M2} = \rho_w - \rho_s \quad (9)$$

Сумирайки уравненията на енергийния баланс за водната (2) и парна (4) фаза и отчитайки уравнение (6) се получава:

$$K_{E1} \frac{dP}{dt} + K_{E2} \frac{dV_w}{dt} = Q_{el} + G_i h_i + G_{spr} h_{spr} \quad (10)$$

в което:

$$K_{E1} = \rho_w V_w \frac{\partial h_w}{\partial P} + \rho_s V_s \frac{\partial h_s}{\partial P} + h_w V_w \frac{\partial \rho_w}{\partial P} + h_s V_s \frac{\partial \rho_s}{\partial P} \quad (11)$$

$$K_{E2} = \rho_w h_w - \rho_s h_s \tag{12}$$

Системата диференциални уравнения (7) и (10) е решена относно dP/dt :

$$\frac{dP}{dt} = K_{Q_{el}-P} \cdot Q_{el} + K_{G_i-P} \cdot G_i + K_{G_{spr}-P} \cdot G_{spr} , \tag{13}$$

където:

$$K_{Q_{el}-P} = \frac{K_{M2}}{K_{E1} \cdot K_{M2} - K_{M1} \cdot K_{E2}} \tag{14}$$

$$K_{G_i-P} = \frac{K_{M2} \cdot h_i - K_{E2}}{K_{E1} \cdot K_{M2} - K_{M1} \cdot K_{E2}} \tag{15}$$

$$K_{G_{spr}-P} = \frac{K_{M2} \cdot h_{spr} - K_{E2}}{K_{E1} \cdot K_{M2} - K_{M1} \cdot K_{E2}} \tag{16}$$

Коефициентите – изрази (7, 8, 11, 12, 14, 15, 16) се изчисляват въз основа на режимни, конструктивни и термодинамични параметри, представени в табл. 1. Резултатите за коефициентите в (13) са:

$$K_{Q_{el}-P} = 7,312 \cdot 10^{-7} \text{ MPa/kJ}$$

$$K_{G_i-P} = 7,711 \cdot 10^{-8} \text{ MPa/kg}$$

$$K_{G_{spr}-P} = -1,213 \cdot 10^{-4} \text{ MPa/kg}$$

2.2 Модел на динамиката на нивото

Нивото в КН (H) е пряко свързано с изменението на обема на водата, по известната зависимост:

$$F \frac{dH}{dt} = \Delta V_w , \tag{17}$$

където $F=7 \text{ m}^2$ е напречното сечение на КН.

Следователно за получаване на модел на нивото е необходимо да се получи модел на изменение на обема на водата в КН. Последният модел се извежда от уравнение (1), решено относно производната на водния обем:

$$\frac{dV_w}{dt} = \frac{G_i + G_c - G_e - V_w \frac{\partial \rho_w}{\partial P} \cdot \frac{dP}{dt}}{\rho_w} \tag{18}$$

При изменението на нивото в общия случай количеството кондензирана пара G_c е различно от количеството изпарена вода G_e . Необходимо е в (18) да се заместят G_c и G_e , получени от енергийния баланс съответно на парната и водна части в КН. След заместване и преобразуване израз (18) придобива вида:

$$\frac{dV_w}{dt} = K_{Q_{el}-V_w} \cdot Q_{el} + K_{G_i-V_w} \cdot G_i + K_{G_{spr}-V_w} \cdot G_{spr} + K_{P'} \cdot \frac{dP}{dt} + K_{VP'} \cdot V_w \cdot \frac{dP}{dt} \tag{19}$$

където коефициентите са:

$$K_{Q_{el}-V_w} = -\frac{1}{\rho_w \cdot h_r} \tag{20}$$

$$K_{G_i-V_w} = \frac{h_r + h_i - h_w}{\rho_w \cdot h_r} \tag{21}$$

$$K_{G_{spr}-V_w} = \frac{h_s - h_{spr}}{\rho_w \cdot h_r} \tag{22}$$

$$K_{P'} = \frac{\rho_s V_s}{\rho_w \cdot h_r} \cdot \frac{\partial h_s}{\partial P} \quad (23)$$

$$K_{VP'} = \frac{1}{h_r} \frac{\partial h_w}{\partial P} - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial P} \quad (24)$$

Стойности на параметри и коефициенти

Таблица 1

| № | Наименование на параметъра | Означ. | Размерност | Стойност |
|-----|--|--|--|--|
| 1. | Топлинна мощност на реактора | Q _p | MW | 3000 |
| 2. | Средна температура на топлоносителя в I контур | T _{cp} | °C | 301 ± 1.5 |
| 3. | Работно налягане на изхода от АЗ | P | MPa | 15.68 ± 0.14 |
| 4. | Температура на топлоносителя в горещите тръбопроводи | T _{гт} | °C | 318 |
| 5. | Температура на топлоносителя в студените тръбопроводи | T _{ст} | °C | 288 |
| 6. | Плътност на парата в КН | ρ _s | kg/m ³ | 103.957 |
| 7. | Плътност на водата в КН | ρ _w | kg/m ³ | 605.989 |
| 8. | Енталпия на парата в КН | h _s | kJ/kg | 2591.596 |
| 9. | Енталпия на водата в КН | h _w | kJ/kg | 1638.908 |
| 10. | Ентлпия на топлоносителя в горещите тръбопроводи | h _i | kJ/kg | 1441.738 |
| 11. | Ентлпия на топлоносителя в студените тръбопроводи | h _{spr} | kJ/kg | 1275.776 |
| 12. | Коефициент | $\frac{\partial h_w}{\partial P}$ | [kJ/kg]/MPa | 40.15 |
| 13. | Коефициент | $\frac{\partial h_s}{\partial P}$ | [kJ/kg]/MPa | -30.975 |
| 14. | Коефициент | $\frac{\partial \rho_w}{\partial P}$ | [kg/m ³]/MPa | -19.224 |
| 15. | Коефициент | $\frac{\partial \rho_s}{\partial P}$ | [kg/m ³]/MPa | 11.425 |
| 16. | Коефициент | $\frac{\partial \rho_{1k}}{\partial T_{1k}}$ | [kg/m ³ °C] | -1.995 |
| 17. | Общ обем на I контур без КН - реактор - парогенератори - ГЦП - ГЦТ - тръбопроводи КН и САОЗ от страната на реактора | V _{1к-р} | m ³ m ³ m ³ m ³ m ³ m ³ | 293 110 4×20.5 4×3 4×21 5 |
| 18. | Обем от КН, запълнен с вода | V _w | m ³ | 55 |
| 19. | Обем от КН, запълнен с пара | V _s | m ³ | 24 |

Получените стойности на коефициентите в уравнение (19), изчислени по изрази (20)-(24) са:

$$\begin{aligned}
 K_{Qel-Vw} &= -1,732 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kJ} \\
 K_{Gi-Vw} &= 1,992 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \\
 K_{Gspr-Vw} &= 2,279 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \\
 K_P &= -133,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{MPa} \\
 K_{VP} &= 73,866 \cdot 10^{-3} \text{ 1/MPa}
 \end{aligned}$$

Дебитът на вода G_i , който постъпва от първи контур към КН или обратно, е входно въздействие влияещо върху нивото. Причината за поява на този дебит е разширението/свиването на топлоносителя в първи контур, предизвикано от изменение на средната температура. Връзката между средната температура и масата в контура се намира от уравнението за съхранение на масата на топлоносител в I контур:

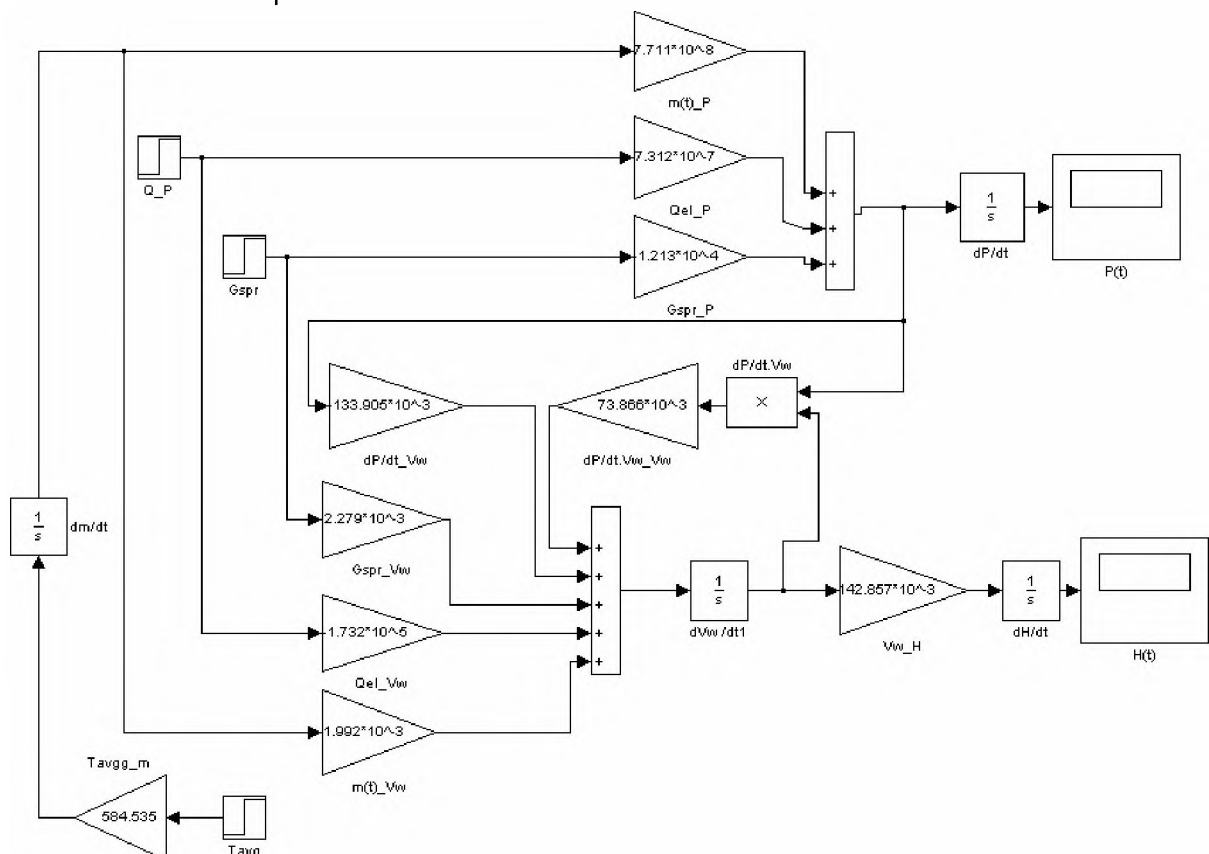
$$\frac{dm_{1k}}{dt} = \Delta G_{f_b} - V_{1k} \frac{\partial \rho_{1k}}{\partial T_{1k}} \Delta T_{1cp}(t) = \Delta G_{f_b} - K_{T_G} \cdot \Delta T_{1cp}(t), \tag{25}$$

където: ΔG_{f_b} е баланса между подхранване и продухване на първи контур; V_{1k} е обема на топлоносител в първи контур, изключвайки КН, и има стойност 293 m^3 ; ΔT_{1cp} е отклонението на средната температура на първи контур от номиналната ѝ стойност.

За стойността на коефициента K_{T_Gi} се получава $584,5 \text{ kg}/^\circ\text{C}$.

3. Симуляционен модел

Системата диференциални уравнения, описваща динамиката на налягането и нивото в КН е решена числено. За целта е създаден симуляционен модел в графичната среда SIMULINK/MATLAB – фиг. 2.

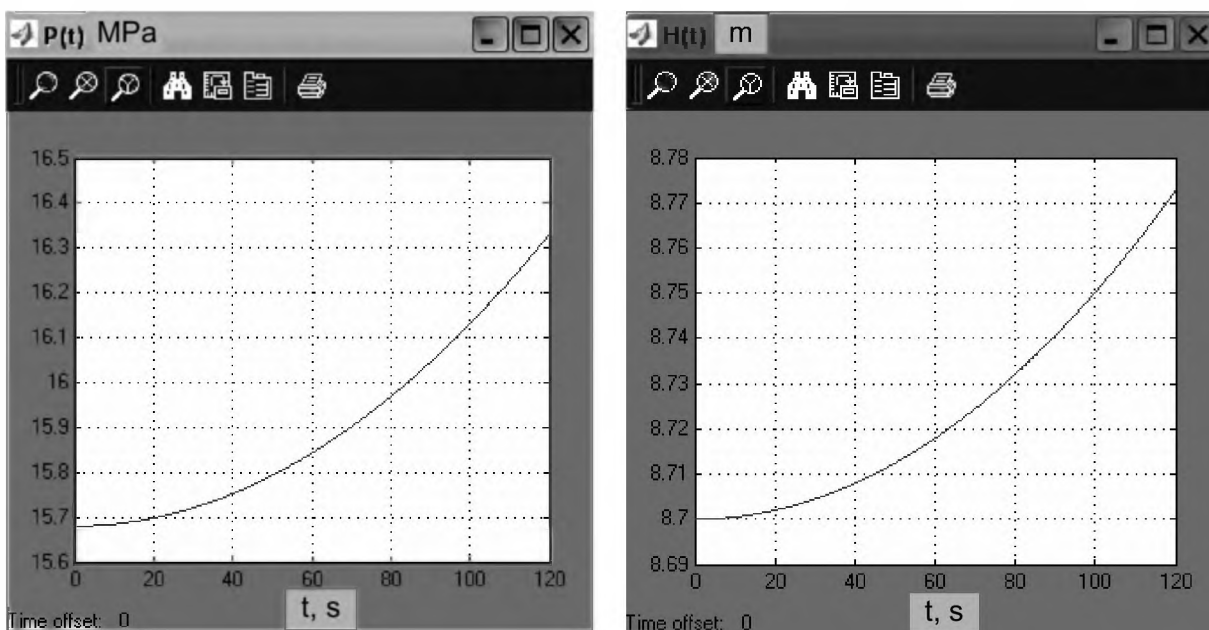


Фиг. 2 Симуляционен модел на динамиката на налягането и нивото в КН

4. Резултати от моделни изследвания

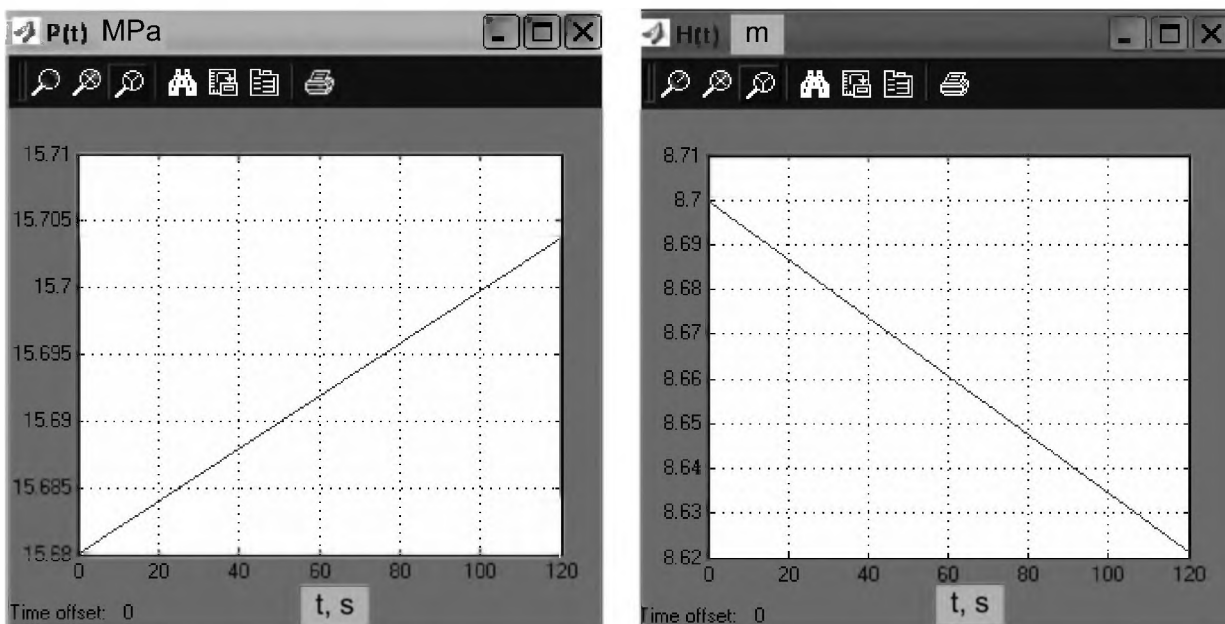
Моделните изследвания са извършени чрез подаване на входни въздействия – регулиращи и смущаващо, имащи стъпален характер. Изходният режим съответства на номиналния режим на КН – налягане 15,68 MPa и ниво 8,7 m.

Преходните характеристики на налягането ($P(t)$) и нивото ($H(t)$) в КН при основно външно смущаващо въздействие - средната температура на I контур ΔT_{1cp} (нарастване с 2 °C) са показани на фиг. 3.



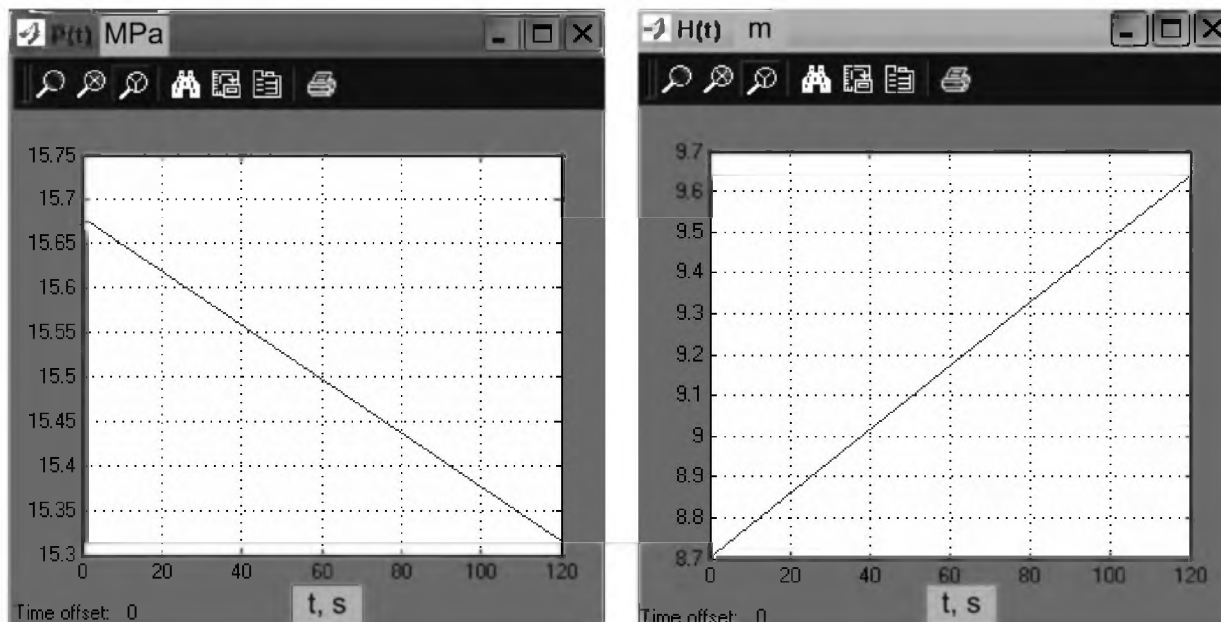
Фиг. 3 Преходни характеристики на налягането (P) и нивото (H) при входно въздействие увеличаване на средната температура в първи контур с 2 °C

На фиг. 4 са показани преходни характеристики на налягането и нивото в КН при едно от регулиращите въздействия - включване на секция ел. нагреватели с мощност $Q_{el} = 270$ kW.



Фиг. 4 Преходни характеристики на налягането (P) и нивото (H) при входно въздействие включване на секция ел. нагреватели 270 kW

На фиг. 5 са показани преходните характеристики на налягането и нивото в КН при друго регулиращо въздействие – впръск (G_{spr}) в парното пространство на КН, в случая с дебит 25 kg/s.



Фиг. 5 Преходни характеристики на налягането (P) и нивото (H) при входно въздействие впръск с дебит 25 kg/s

Изводи и заключение

Използваният подход за създаване на модела е конвенционален. Отличителна черта на модела е неговата пълнота, т.е. моделирани са всички динамични канали на КН като обект за управление.

Създаденият аналитичен модел е верифициран частично, чрез сравняване на коефициенти в него със съответните им коефициенти в [1]. Пълна верификация чрез сравнение с експериментални данни не е направена поради липса на такива. Получените преходни характеристики съответстват както качествено, така и количествено на поведението на налягането и нивото при експлоатацията на компенсатора на налягане.

Моделът позволява подаване както на един, така и на различни комбинации от сигнали на входовете, а именно смуцаващ и управяващи сигнали, като при това може да се види до каква степен управляващото въздействие е в състояние да приведе системата в състояние със зададените параметри. Моделът може да се използва за решаване на проблеми, от гледна точка на възможностите за управление на параметрите в КН, а именно – тестване на различни алгоритми за регулиране на налягането и нивото с цел подобряване на качеството на управление.

Литература

- [1] Демченко В. А., Автоматизация и моделерование технологических процессов АЭС и ТЭС, "Астропринт", Одесса, 2001.
- [2] Larsen N., Simulation model of a PWR power plant, "Riso national laboratory", Denmark, 1987.

Автори: инж. Костадин Петков, студент ОКС «магистър», e-mail: petkoff_ne@mail.bg
доц. д-р инж. Александър Григоров, ТУ-София, e-mail: grigorov@tu-sofia.bg