

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДГРІВНИКІВ ЖИВИЛЬНОЇ ТА МЕРЕЖНОЇ ВОДИ ТЕС В КОМП'ЮТЕРНОМУ ТРЕНАЖЕРІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянута методика математичного моделювання підігрівників живильної та мережної води енергоблоку ТЕС для комп'ютерного тренажера. Наведений опис елементів тренажера з експлуатації підігрівників.

Ключові слова: ТЕС; підігрівники; комп'ютерний тренажер; математичні моделі.

Abstract

The method of mathematical modeling of power and network water heaters for the power unit of the TPP for a computer simulator is considered. The description of elements of the simulator of operation of the heaters is given.

Keywords: thermal power plant (TPP); heaters; computer simulator; mathematical models.

Вступ

Причиною більшості аварій на ТЕС є помилки експлуатаційного персоналу. Зношеність обладнання ТЕС ускладнює його експлуатацію та підсилює необхідність підвищення рівня операторської підготовки, як на ТЕС, так і в навчальних закладах. Одним з засобів навчання операторів є комп'ютерні тренажери з устаткування енергоблоків. Важливим елементом ТЕС є підігрівники живильної та мережної води. Метою роботи є розробка тренажера з експлуатації підігрівників в складі енергоблоку.

Основна частина

В експлуатації енергоблоків найбільш складними є їх пуск та зупинка. Пускова схема блоку 300 МВт показана на рис. 1.

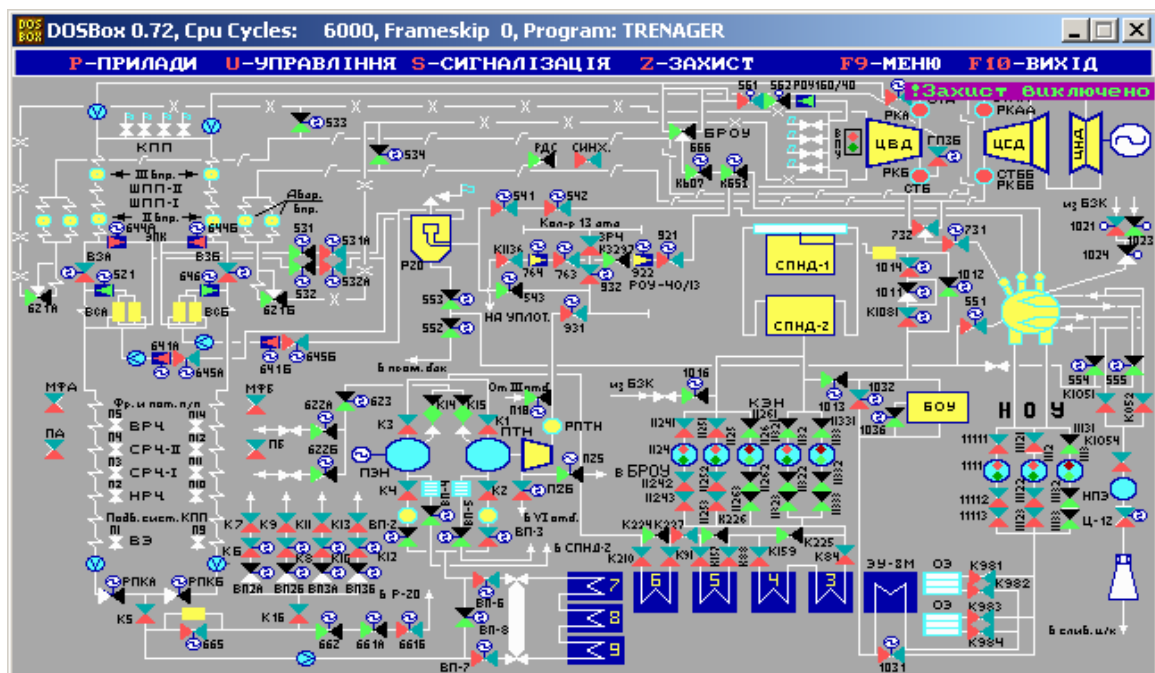


Рис. 1.

Пускова схема енергоблоку

Конденсат з конденсатору при температурі 25 °С надходить до групи конденсатних насосів НОУ, далі проходить через підігрівники низького тиску СПНД-1, СПНД-2 та підігрівники 3, 4, 5, 6. З шостого підігрівника конденсат (живильна вода) надходить до живильного насосу, яким прокачується через підігрівники високого тиску (ПВТ) 7, 8, 9. З ПВТ9 живильна вода з температурою 265 °С прямує до парогенератора. Підігрівники СПНД-1, СПНД-2 є змішувального (контактного) типу, підігрівники 3-9 – вертикальні, поверхневі, з них підігрівники 3-5 з трубними дошками та U-подібними трубками, а підігрівники 7-9 колекторні з привареними змійовиками.

Математичне моделювання схеми блоку виконано методом ПМАШ-ВНТУ [1]. Структура схеми передана графом з 3000 вузлів та 4000 дуг, закодованих відповідно апаратам та теплоносійм їх прообразів. Математичний опис схеми здійснений бібліотекою рівнянь із 150 підрозділів. Кожний підрозділ містить систему рівнянь розрахунку апарата визначеного типу та конструктивного виконання – насос, підігрівник, регулятор та інше. Імена підрозділів бібліотеки відповідають кодам вузлів графа. Робота програмної реалізації методу полягає у перебиранні вузлів графа, формуванні з підрозділів бібліотеки загальної системи рівнянь та її розрахунку методом ітерацій. Складовою методу ПМАШ-ВНТУ є методика ідентифікації моделі апарата по експериментальним (розрахунковим або фактичним) даним. Сутність методики полягає в наступному. 1. За основу моделі приймається інтегральний (спрощений) метод визначення даної характеристики. 2. Метод доповнюється системою ідентифікуючих рівнянь, вид яких встановлюється на основі математичної обробки матеріалу по фізичному експерименту. 3. Емпіричні коефіцієнти в цій системі вважаються величинами середньостатистичними і в конкретних випадках реалізації моделі можуть змінюватися. 4. Припускається, що для даної моделі можна отримати деяку обмежену за обсягом інформацію про характеристику моделюемого елемента. 5. Ставиться задача підібрати значення емпіричних коефіцієнтів моделі так, щоб відхилення значень характеристик, визначених за допомогою моделі, від відомих були мінімальними.

Процеси в підігрівниках поділяються на гідравлічні та теплові. Першим гідравлічним процесом є заповнення та спустошення водяного трубного простору. Моделювання цього процесу виконується за допомогою формули заповнення і спустошення бака з припливом (зливом) та ідентифікаційного (корегуючого) рівняння. Другим процесом є зміна рівня конденсату грючої пари. При змінах навантаження енергоблоку рівень конденсату грючої пари повинен залишатися однаковим. Це виконує автоматична система регулювання (АСР). Схема регулювання рівня конденсату в ПВТ зображена на рис. 2.

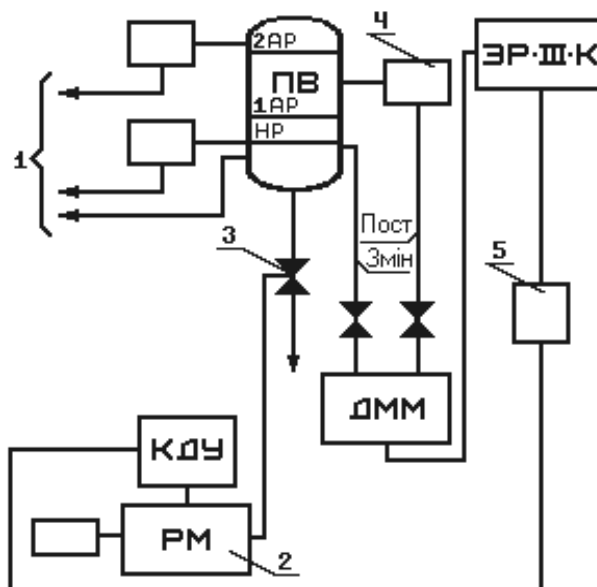


Рис. 2. Схема регулювання рівня конденсату в ПВТ

ПВ – підігрівник; 1АР, 2АР – перший і другий аварійні рівні; НР – нормальний рівень; Змін, Пост – лінії змінного і постійного рівня, ДММ – диференціальний манометр; ЕР-Ш-К – електронний

регулюючий прилад; КДУ — колонка дистанційного управління для керування сервоприводами; 1 — до системи автоматичного захисту, 2(РМ) — сервомотор, 3 — регулюючий клапан, 4 — конденсатний бачок, 5 — магнітний контактор

Регулюючий клапан встановлюється на трубопроводі виходу конденсату з підігрівника, рис. 3.

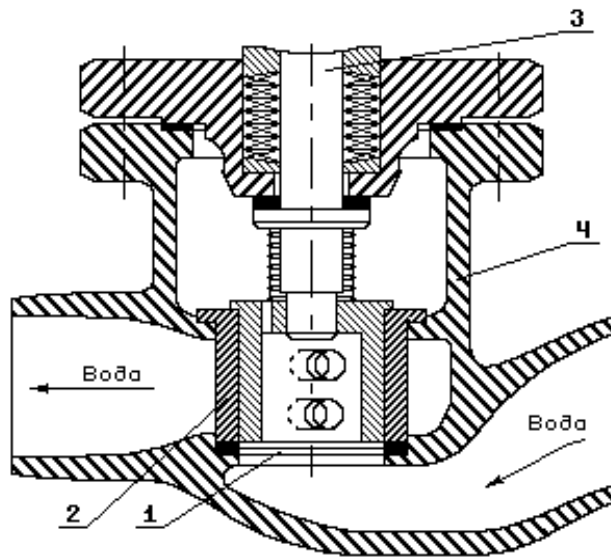


Рис. 3. Регулюючий клапан

1 — золотник; 2 — гільза; 3 — валик; 4 — корпус

Відвід конденсату регулюється зміною площі прохідного перетину за рахунок повороту важеля з валиком 3 і золотником 1. У залежності від кута повороту важеля отвору в золотнику перекривають отвір в гільзі 2, закріпленої в корпусі 4. Кут повороту важеля від відкритого до закритого положення клапана дорівнює 90 градусів.

ПВТ є апаратом підвищеної небезпеки і більшість аварій на ТЕС трапляються саме з ними. Вага ПВТ – 100 тон, висота – 10 м, діаметр – 4 м. В середині ПВТ знаходиться пара з температурою до 450 °С і в ньому є 2000 швів зварювання до колекторів трубок в яких протікає вода під високим тиском (до 400 атмосфер). При руйнуванні шва вода може заповнити ПВТ, через трубопровід гріючої пари потрапити в турбіну і зруйнувати її. Тому, системі захисту ПВТ від переповнення приділяється особлива увага. При досягненні 1-го аварійного рівня всі ПВТ відключаються. При досягненні 2-го аварійного рівня зупиняється енергоблок. Час зупинки енергоблоку повинен бути меншим часу аварійного заповнення ПВТ. Розрахункова схема для визначення часу заповнення групи ПВТ водою з пошкоджених труб наведена на рис. 4.

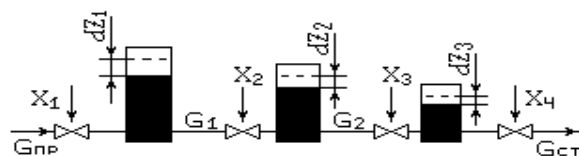


Рис. 4. Схема групи ПВТ

Схема складена з трьох ємностей, трьох клапанів регуляторів рівнів та засувки на вході пари до останнього ПВТ. В математичній моделі групи ПВТ, створеній за методикою [2], гідравлічні процеси описані системою з трьох лінійних диференційних рівнянь. Вхідними

величинами є площі перерізів клапанів X_1, X_2, X_3, X_4 , а вихідними величинами є рівні конденсату пари в підігрівниках $Z_1(t), Z_2(t), Z_3(t)$.

Рівняння матеріального балансу ємностей підігрівників з поперечними перерізами F_1, F_2, F_3 мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} Z_1(t) &= \frac{G_{np}(t) - G_1(t)}{F_1}; \\ Z_2(t) &= \frac{G_1(t) - G_2(t)}{F_2}; \\ Z_3(t) &= \frac{G_2(t) - G_3(t)}{F_3}. \end{aligned}$$

Витрати рідини по тракту:

$$\begin{aligned} G_{np} &= (P_{np}^0 - Z_1)^{1/2} X_1; \\ G_1 &= (Z_1 - Z_2)^{1/2} X_2; \\ G_2 &= (Z_2 - Z_3)^{1/2} X_3; \\ G_{ct} &= 2(Z_3)^{1/2} X_4, \end{aligned}$$

де G_{np}, G_{ct} – витрати рідини на вході і виході, P_{np}^0 – тиск рідини на вході. Тут розглядається режим із скиданням рідини в конденсатор з тиском, близьким до нуля.

Система нелінійних рівнянь

$$\begin{aligned} Z_1'(t) &= (P_{np}^0 - Z_1(t))^{1/2} X_1(t) - (Z_1(t) - Z_2(t))^{1/2} X_2(t); \\ Z_2'(t) &= (Z_1(t) - Z_2(t))^{1/2} X_2(t) - (Z_2(t) - Z_3(t))^{1/2} X_3(t); \\ Z_3'(t) &= (Z_2(t) - Z_3(t))^{1/2} X_3(t) - 2(Z_3(t))^{1/2} X_4(t). \end{aligned}$$

Система лінеаризованих рівнянь з коефіцієнтами:

$$\begin{aligned} Z_1'(t) &= 0,483Z_1(t) + 0,283Z_2(t) + 1X_1(t) - 1,414X_2(t); \\ Z_2'(t) &= 0,283Z_1(t) + 0,566Z_2(t) + 0,283Z_3(t) + 1,414X_2(t) - 1,414X_3(t); \\ Z_3'(t) &= 0,283Z_2(t) + 0,424Z_3(t) + 1,414X_3(t) - 2,828X_4(t); \\ Y(t) &= Z_3(t). \end{aligned}$$

Для розв'язання цієї системи використаний метод Кутта - Мерсона з регульованим кроком.

За допомогою математичної моделі виконані розрахунки часу аварійного заповнення корпусів ПВТ конденсатом і живильною водою через декілька розірваних трубок останнього по ходу руху живильної води ПВТ (ПВТ9) при повністю відкритих всіх клапанах регуляторів рівня. Результати розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Зростання рівнів в підігрівниках при розривах трубок з живильною водою в ПВТ9

Т _{хв}	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,5
Z ₁ , м	0,172	0,39	0,66	0,997	1,43	2,01	1,75	3,74	5,1	6,85	9,3	10
Z ₂ , м	0,001	0,047	0,125	0,263	0,49	0,86	1,4	2,23	3,47	5,27	7,93	8,76
Z ₃ , м	0,00004	0,0035	0,014	0,04	0,092	0,19	0,37	0,65	1,12	1,85	2,99	3,36

Як видно з таблиці, дев'ятий підігрівник повністю заповнюється через 4.5 хвилини.

Теплові процеси описуються рівняннями теплового балансу теплоносіїв та теплопередачі. Оцінки часу перехідних теплових процесів виконуються за допомогою математичної моделі теплообмінної труби з зосередженими параметрами [3].

$$\frac{dt_c}{d\tau} = (-c_2 t_c + c_3 t_n + c_4 \theta) \div c_1,$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = (-d_2^* \theta + d_3 t_c + d_5^*) \div d_1^*$$

У випадку кипіння і пароутворення

$$\frac{d\theta}{d\tau} = (-d_2 \theta + d_3 t_c + d_5 - d_4 W) \div d_1^*,$$

де t_c – температура стінки; t_n – температура грючої пари або води; θ – температура нагріваємої води; τ – час; $c_1, c_2, c_3, c_4, d_1^*, d_2^*, d_3, d_4, d_5^*$ – коефіцієнти; W – витрата пари.

Модель реалізована програмою на мові Турбопаскаль. Початкові дані в позначеннях програми такі: 1. d_n , м – зовнішній діаметр; 2. d_{st} , м – товщина стінки; 3. l_{tr} , м – довжина труби; 4. λ_{bst} , Вт/(м·гр) – коефіцієнт теплопровідності стінки труби; 5. α_1 , Вт/(м²·гр) – коефіцієнт тепловіддачі від пари до стінки; 6. α_2 , Вт/(м²·гр) – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до рідини; 7. δ_{nak} , м – товщина шару накипу; 8. λ_{nak} , Вт/(м·гр) – коефіцієнт теплопровідності накипу; 9. ρ_{st} , кг/м³ – питома вага матеріалу стінки труби; 10. c_{st} , кДж/(кг·гр) – теплоємність матеріалу стінки труби; 11. $c_{v,нас}$, кДж/(кг·гр) – теплоємність рідини; 12. $\rho_{v,нас}$, кг/м³ – густина рідини; 13. l_{ur} , м – рівень рідини; 14. ω_V , м/с – швидкість рідини; 15. $i_{11,v}$, кДж/кг – ентальпія вторинної пари; 16. t_{eta} , °С – температура рідини; 17. t_p , °С – температура пари.

Розрахунок коефіцієнтів рівнянь в позначеннях програми виконуються за формулами:

$$d_{vn} = d_n^2 \cdot d_{st};$$

$$G_{st} = ((3.14 \cdot d_n^2) / 4 - (3.14 \cdot d \cdot V_n^2)) \cdot l_{tr} \cdot \rho_{st};$$

$$c_1 = c_{st} \cdot G_{st};$$

$$c_3 = (3.14 \cdot d_n \cdot l_{tr}) / (1 / (\alpha_1) + d_{st} / (21 \cdot \lambda_{bst}));$$

$$c_4 = (3.14 \cdot d_n \cdot l_{tr}) / (1 / (\alpha_2) + d_{st} / (21 \cdot \lambda_{bst}) + \delta_{nak} / \lambda_{nak});$$

$$c_2 = c_3 + c_4;$$

$$d_1 = C_{v,нас} \cdot \rho_{v,нас} \cdot (3.14 \cdot d_n^2) / 4 \cdot l_{ur};$$

$$d_{11} = C_{v,нас} \cdot \rho_{v,нас} \cdot (3.14 \cdot d_n^2) / 4 \cdot l_{tr};$$

$$s_{0m} = (3.14 \cdot d \cdot V_n^2) / (4 \cdot 0.001) \cdot \omega_V;$$

$$d_{21} = c_4 + s_{0m} \cdot C_{v,нас} \cdot 2;$$

$$S_{1m} = s_{0m};$$

$$d_2 = c_4 + S_{1m} \cdot C_{v,нас};$$

$$d_3 = c_4;$$

$$d_4 = i_{11,v} \cdot V_t;$$

$$d_5 = s_{0m} \cdot C_{v,нас} \cdot t_{eta};$$

$$d_{51} = 2 \cdot d_5.$$

Далі виконується розв'язок системи вищенаведених диференційних рівнянь методом Кута-Мерсона з регулюємим кроком.

На відміну від підігрівників живильної води підігрівники мережної води (бойлери) мають регулятори температури нагріваємої води. Схема контуру регулювання температури води в основному бойлері наведена на рис. 5. По такій схемі виконаний контур регулювання температури води і в піковому бойлері, що гріє воду з 120 до 150 °С.

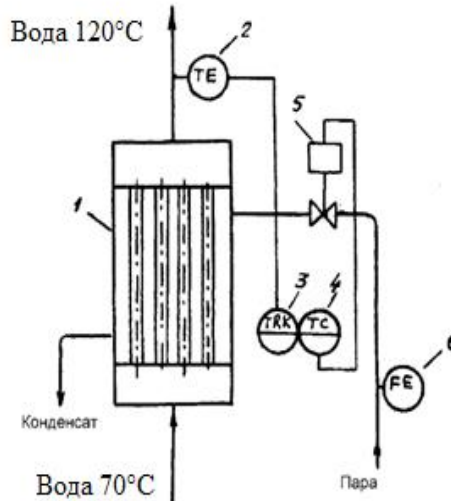


Рис. 5. Схема контуру регулювання температури води в основному бойлері
 1 - теплообмінник; 2 - датчик температури; 3 - станція управління регулятора; 4 - регулятор;
 5 - регулювальний клапан; 6 - діафрагма для виміру витрати пари

Для визначення часу перехідних процесів регулювання температури води використана методика [4]. Розрахунок перехідного процесу в піковому бойлері потужністю 23,4 МВт виконаний так. За збурення прийняте збільшення витрати гріючої пари на 15%, внаслідок чого підвищення температури води Δt склало $5,1^\circ\text{C}$.

Температура на виході з бойлера $t_v(\tau)$ розраховується по формулі:

$$t_v(\tau) = t_1 - \Delta t \cdot x_v(\tau),$$

де t_1 – температура на виході з бойлера до збурення (150°C), $\Delta t = 5,1^\circ\text{C}$, $x_v(\tau)$ – рівняння відносної зміни температури води в перехідному процесі регулювання. Рівняння $x_v(\tau)$ отримано з відомої передатної функції двохемістних об'єктів, до яких відноситься теплообмінник, передатних функцій Пі-регулятора та замкненої АСР для заданих параметрів бойлера. Воно має наступний вигляд:

$$x_v(t) = 1 - 0,99 \cdot e^{-0,27 \cdot \tau} + 0,33 \cdot e^{-0,67 \cdot \tau} \cdot \sin(1,33 \cdot \tau + 0,023)$$

Результати розрахунків зміни температури води в часі після дії збурювання показані в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків зміни температури води в часі після дії збурювання

τ , хв	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$x_v(\tau)$	0,042	0,455	0,696	0,836	0,918	0,966	0,993	1,01	1,019	1,025
$t_v(\tau)$	155,1	152,778	151,55	150,835	150,418	150,175	150,033	149,951	149,903	149,8875

З таблиці видно, що температура досягає заданого значення 150°C через 13 хвилин після нанесення збурювання.

Ідентифіковані за результатам розрахунків перехідних процесів математичні моделі підігрівників використані в комп'ютерному тренажері. Мнемосхеми ПВТ7, 8, 9 та блок управління ПВТ БІУ-8 наведені на рис. 6.

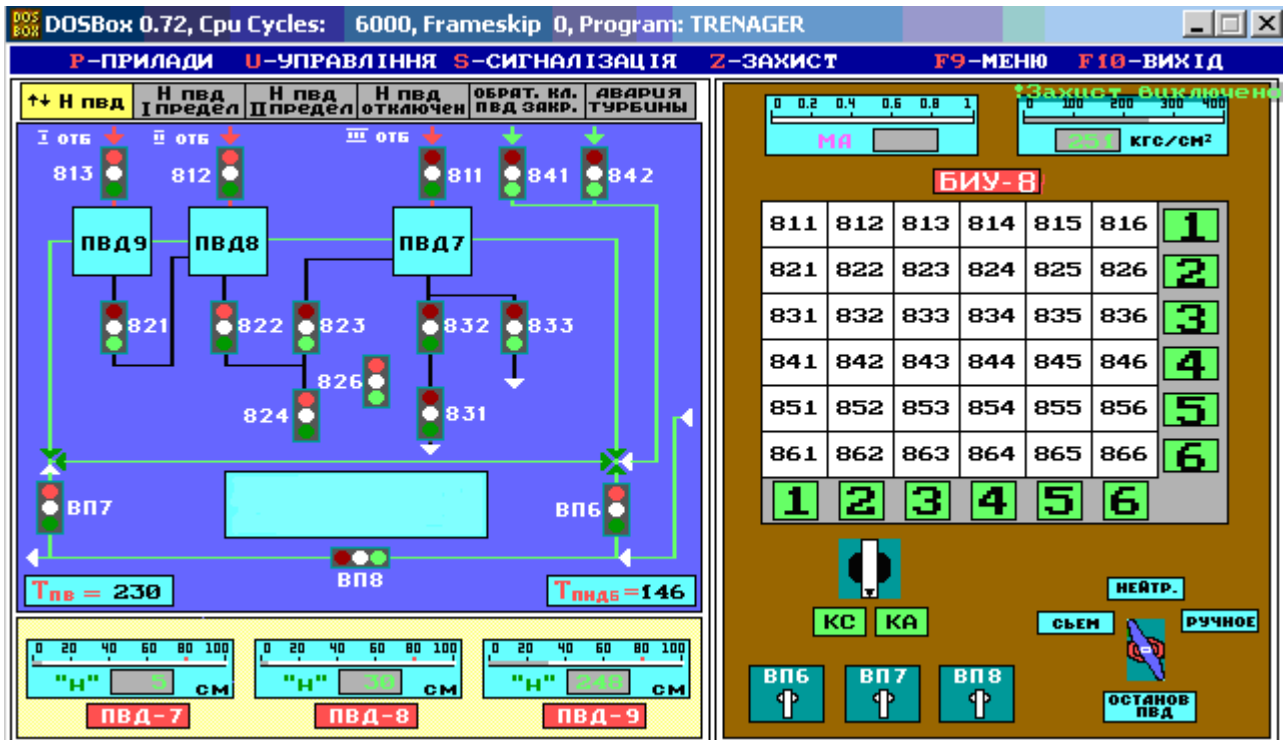


Рис. 6. Мнемосхеми ПВД7, 8, 9 та блок управління ПВД БИУ-8

В верхній частині мнемосхеми зображені табло сигналізації, які підсвічуються жовтим кольором при невеликих відхиленнях контролюємих параметрів від нормативних та червоним – при відхиленнях аварійних. В нижній частині виводяться рівні конденсатів підігрівників Н. На мнемосхемі 811, 812, 813 – парові засувки; 821, 822, 831 – регулятори рівня конденсату. Червоні лампочки відповідають положенню засувки або клапанів регуляторів “відчинено”, зелені – “зачинено”, “жовті” – проміжному положенню клапанів та засувки. Управління клапанами та засувками з БИУ-8 відбувається так. Натисканням на горизонтальні та вертикальні клавіші 1-6 викликається (підсвічується на табло з номерами засувки та клапанів) потрібний орган управління. Після повертання ключа, що розташований під табло, вправо або вліво засувка сама рухається до крайнього положення. При відкритті клапана, міра його відкриття відповідає куту повороту ключа. Міра відкриття засувки або клапана виводиться на табло з написом «МА». Повний час відкриття засувки до 60 с, і при необхідності зупинення засувки, що рухається, натискають на кнопку «КС» (стоп). Кнопкою КА (автомат) регулятор включається або вимикається. Засувки ВП6, 7, 8 відкриваються та закриваються відповідними ключами. Якщо ключ «Останов ПВД» знаходиться в положенні «Нейтр», то вмикається захист ПВД по першій межі рівня. Якщо ключ «Останов ПВД» знаходиться в положенні «Съём», то захист знімається. Якщо ключ «Останов ПВД» знаходиться в положенні «Ручное», то ПВД відключається. Включення захисту по другій межі рівня виконується натисканням на кнопку Z.

Висновки

1. Розглянуті математичні моделі підігрівників живильної та мережної води енергоблоку ТЕС для комп'ютерного тренажера.
2. Розроблений комп'ютерний тренажер з експлуатації підігрівників живильної та мережної води в складі енергоблоку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Головченко О. М. Удосконалення методів розрахунку теплоенергетичних установок [Електронний ресурс] / О. М. Головченко, О. М. Нанак // Матеріали XLV Науково-технічної конференції ВНТУ, Вінниця, 23–24 березня 2016 р. – Електрон. текст. дані. – 2016. – Режим доступу: <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2016/paper/view/557>. – Назва з екрана.

2. Ротач В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296с.

3. Белик В. Г. Справочник по моделированию и оптимизации теплообменного оборудования сахарной промышленности / В. Г. Белик, И. И. Костанжи. – Москва: АГРОПРОМИЗДАТ, 1986. – 271 с.

4. Ефимов В. Т., Молчанов В. И., Ефимов А. В. Методы расчетов химико-технологических и теплоэнергетических процессов / Молчанов В. И., Ефимов А. В. – Харьков. ХГПУ, 1998г. – 316с.

Головченко Олексій Михайлович – к. т. н., доцент кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: aleksey.golovch@gmail.com;

Нанак Олена Миколаївна – к. т. н., доцент кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: e_nanaka@ukr.net.

Golovchenko Oleksiy M. – PhD, assistant professor at the department of renewable energy and electrical transportation systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: aleksey.golovch@gmail.com;

Nanaka Olena M. – PhD, assistant professor at the department of renewable energy and electrical transportation systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: e_nanaka@ukr.net.