

УДК 681.51

Бланарь П.Г.

Одесский национальный политехнический университет

Улицкая Е.О.

Одесский национальный политехнический университет

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНТУРА ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Актуальность применения когенерационных энергетических установок малой мощности как альтернативных источников снабжения теплом, электричеством и горячим водоснабжением известна давно. В статье предложена система автоматического управления участка утилизации выхлопных газов и участка теплопередачи в пользовательскую сеть когенерационной энергетической установки с тепловым двигателем в виде двигателя внутреннего сгорания. Система управления синтезирована на базе нелинейной математической модели динамики участка тепловой энергии, производимой когенерационной установкой, и обеспечивает стабильную работу системы отопления и горячего водоснабжения в широком диапазоне нагрузок. Разработанная система является инвариантной к изменению температуры наружного воздуха и температуры воды в сети холодного водоснабжения.

Ключевые слова: когенерационная установка, система автоматического управления, нелинейная модель, газо-водяной теплообменник, водо-водяной теплообменник.

Постановка проблемы. Расчеты технико-экономических показателей когенерационных энергетических установок с тепловыми двигателями в виде двигателя внутреннего сгорания (ДВС) подтверждают их высокую экономичность [1]. Таким образом, подтверждается необходимость и актуальность дальнейшего изучения характеристик КЭУ как генератора энергетической продукции.

В когенерационных установках для выработки тепловой энергии используются выхлопные газы двигателей различного строения, которые через теплообменник отдают энергию в магистраль. Тепло, обычно рассеиваемое в атмосферу, в когенерационных установках утилизируется для полезного использования в бытовых или промышленных процессах.

Анализ последних исследований и публикаций. Значительные потери теплоты в централизованных системах отопления и горячего водоснабжения (ГВС) при транспортировке теплоносителей, а также невозможность их транспортировки приводят к необходимости децентрализации теплогенерирующих установок. При использовании двигателей внутреннего сгорания (поршневых двигателей) возможна утилизация тепла смазочного масла, охлаждающей воды, а также выхлопных газов.

В работе «Выбор экономичной схемы генерации тепла когенерационной энергетической

установки» [2] рассмотрены различные варианты схем регенерации когенерационной энергетической установки на базе газотурбинного двигателя, работающего по регенеративному циклу. На основании полученных данных проведен анализ и выбран наиболее экономичный вариант тепловой схемы из расчета наименьшего значения расхода топлива.

В работе А.Е. Денисовой, А.С. Мазуренко, А.С. Денисовой [3] обоснованы пути повышения эффективности КЭУ за счёт утилизации теплоты системы отопления при установке теплообменников на обратных линиях системы топления, которые подключены к сети ГВС. Однако представленные схемы утилизации тепла не обеспечивают автономности использования контура ГВС без одновременного включения контура отопления.

Вопросам моделирования когенерационной установки на базе линеаризованных математических моделей посвящены работы, отражающие вопросы регулирования электрической нагрузки и частоты вращения турбины КЭУ [4; 5]. Однако вопрос моделирования режимов потребления тепла, производимой КЭУ, остаётся открытым.

Постановка задания. Целью статьи являются разработка и анализ системы автоматического управления процессами передачи тепловой энергии потребителям тепла и горячей воды, производимой когенерационной энергетической установкой

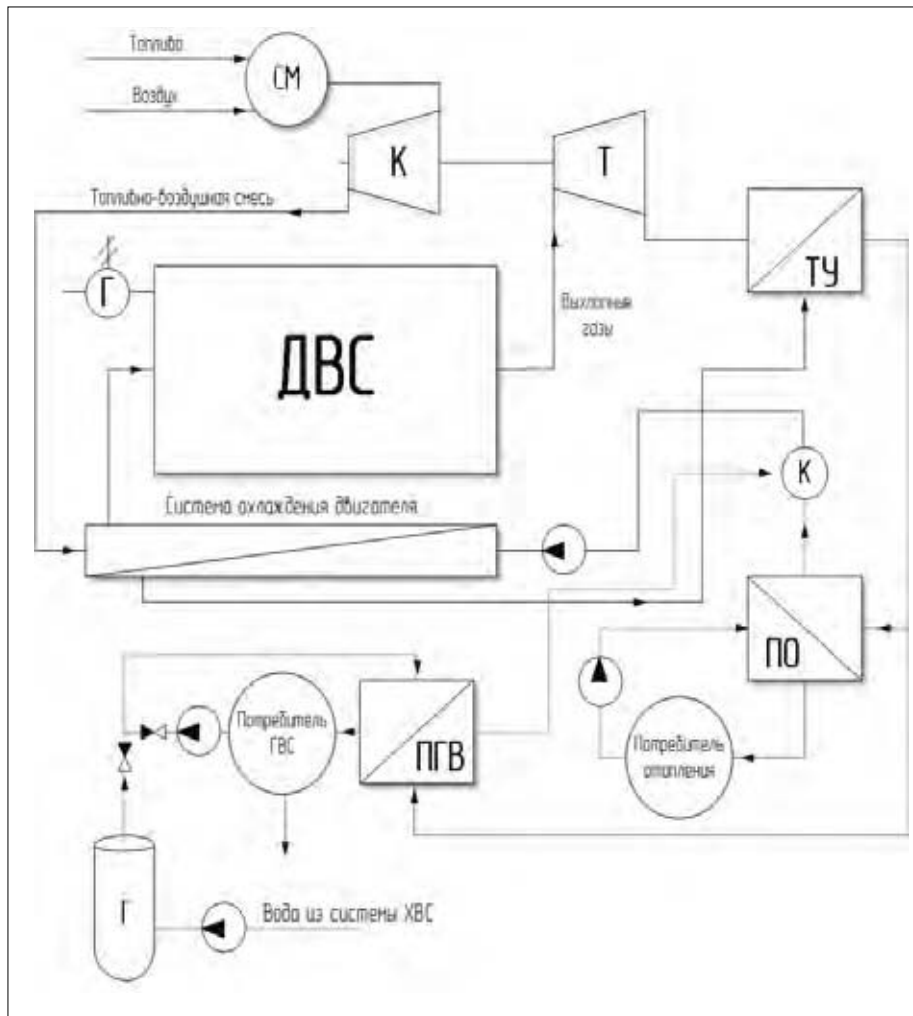


Рис. 1. Структурная схема когенерационной энергетической установки
 СМ – смеситель; К – компрессор; Т – турбина; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; Г – генератор; ТУ – теплоутилизатор; ПО – подогреватель отопления; ПГВ – подогреватель горячего водоснабжения; ГВС – горячее водоснабжение; К – коллектор; Г – гидрофор

с двигателем внутреннего сгорания в качестве теплового двигателя.

Изложение основного материала исследования. Когенерация в Украине стремительно набирает популярность среди частных и коммерческих потребителей. Когенерационные установки способны кардинально снизить капитальные затраты на электро-снабжение и отопление. Они окупают себя уже через 3–4 года постоянной эксплуатации. Фактически когенерационные установки можно рассматривать как аналог стационарной электростанции. В отличие от солнечных и ветряных электростанций, в когенерационных установках выработка электрической и тепловой энергии происходит постоянно в круглосуточном режиме – независимо от времени суток, времени года и температуры окружающей среды [6].

Электрическая полезная энергия возникает в результате процесса сгорания топлива в ДВС и

посредством его вращательного движения преобразуется с помощью синхронного генератора в электрический ток. Тепловая энергия, полученная в результате процесса сгорания этого же топлива в ДВС, представляется как тепло выхлопных газов, блока двигателя и смазочной системы двигателя.

Экономное использование первичной энергии топлива достигается благодаря рекуперации тепла от выхлопных газов, охлаждающей жидкости двигателя, смазки двигателя.

Общая структурная схема рассматриваемой КЭУ представлена на рисунке 1.

В статье ставится задача синтеза системы управления процессами передачи тепловой энергии потребителям тепла и горячей воды, производимой КЭУ с ДВС.

Рис. 2 демонстрирует основные аппараты, параметры управляемых и регулирующих пото-

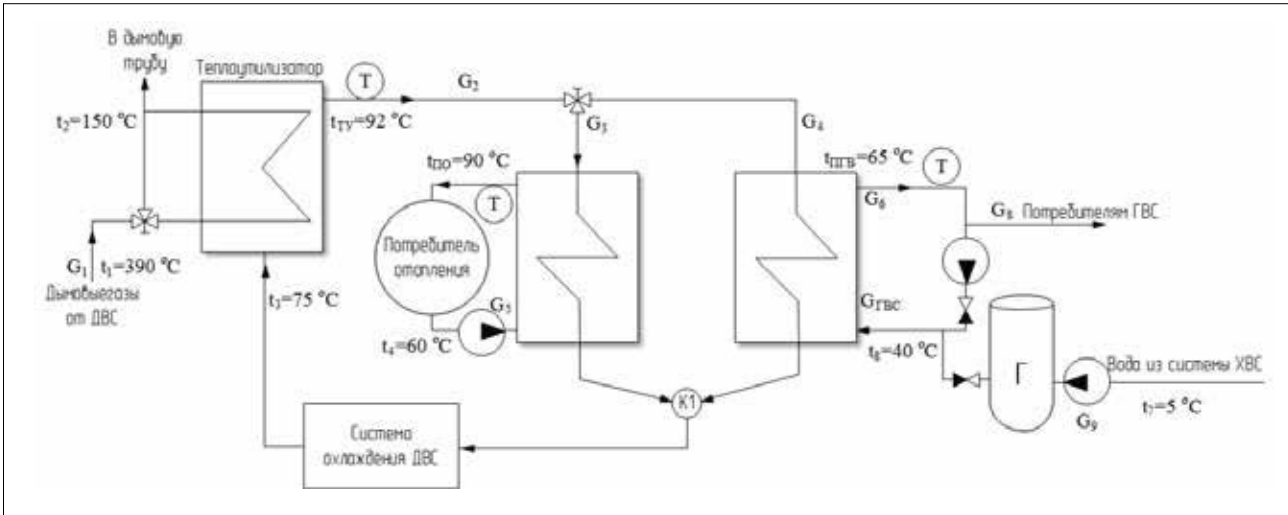


Рис. 2. Структурная схема САУ рассматриваемого участка

ков розробляваної системи автоматичного управління (САУ).

Розроблена система нелінійних рівнянь, описуючих динаміку контура генерації теплової енергії когенераційної установки, має вигляд [7]:

$$\frac{dt_{TY}}{d\tau} = \frac{t_3 \cdot Cp_3 \cdot G_2 + G_1 \cdot (t_1 \cdot Cp_1 - t_2 \cdot Cp_2) - t_{TY} \cdot Cp_{TY} \cdot G_2}{m_{TY} \cdot Cp_{TY}^{sp}}, \quad (1)$$

$$\frac{dt_{ПО}}{d\tau} = \frac{t_4 \cdot Cp_4 \cdot G_5 + G_3 \cdot (t_{TY} \cdot Cp_{TY} - t_5 \cdot Cp_5) - t_{ПО} \cdot Cp_{ПО} \cdot G_5}{m_{ПО} \cdot Cp_{ПО}^{sp}}, \quad (2)$$

$$\frac{dt_{ПГВ}}{d\tau} = \frac{\frac{t_{ПГВ} \cdot G_7 + t_7 \cdot G_9}{G_7 + G_9} \cdot Cp_8 \cdot G_{ГВС} + G_4 \cdot (t_{TY} \cdot Cp_{TY} - t_6 \cdot Cp_6) - t_{ПГВ} \cdot Cp_{ПГВ} \cdot G_6}{m_{ПГВ} \cdot Cp_{ПГВ}^{sp}}, \quad (3)$$

Параметрами стану системи є температури теплоносія на виході теплоутилизатора (t_{TY}), на виході водо-водяного підогревателя опітальної мережі ($t_{ПО}$) і теплоносія на виході водо-водяного підогревателя гарячого водоснабження ($t_{ПГВ}$).

Управляючими впливами в САУ є витрата димових газів (G_1) і витрата води для підогревателя опітальної мережі (G_3).

К зовнішнім впливаючим впливам відносяться температури вихлопних газів на вході в ТУ (t_1), обігріваної води на вході в теплоутилизатор (t_3), обігріваної середовища на вході в водо-водяний підогреватель опітальної мережі (t_4), а також температура і витрата води з мережі ХВС (t_7 і G_9).

Система диференціальних рівнянь (1)–(3) доповнюється алгебраїчeskими рівняннями для описання залежності теплоємності і щільності води як основного теплоносія системи гарячого водоснабження і опітання від температури. Нелінійна система рівнянь розв'язується методом Ейлера з кроком дискретності $\Delta t=1$ с [7].

Розроблявана система автоматичного управління є інваріантною до збурюючої температури зовнішнього повітря, теперішнє значення якої визначає уставку для температури на виході мережі опітання.

Температурний графік для системи опітання (рис. 3) апроксимовано залежністю (4), що зв'язує необхідну температуру теплоносія на виході підогревателя опітальної мережі і температури повітря.

$$t_{ПО} = -0.0066 \cdot t_{ВОЗД}^2 - 1.6 \cdot t_{ВОЗД} + 58, \quad (4)$$

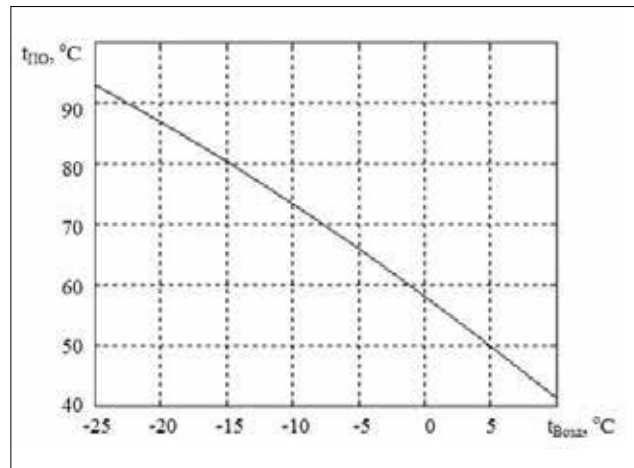


Рис. 3. Температурный график для системы отопления

Підтримання заданого витрати і тиску води в системі ГВС здійснюється насосною станцією, що включає насос, гідроакумулятор на 100 л, манометр і реле тиску.

Регулювання температур теплоносіїв на виході підогревателя опітальної мережі ($y_1=t_{ПО}$) і підогревателя мережі гарячого водоснабження

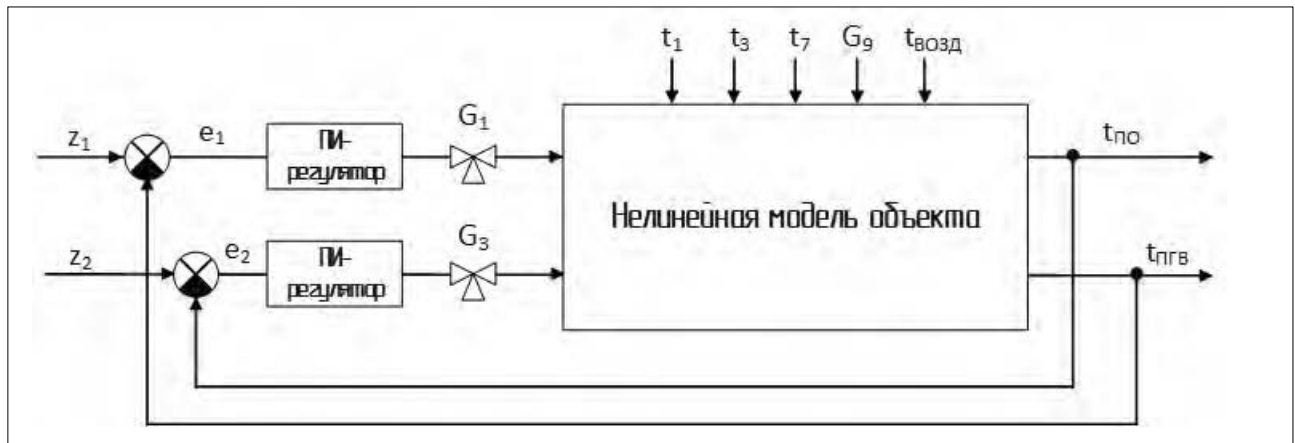


Рис. 4. Структурная схема разработанной САУ

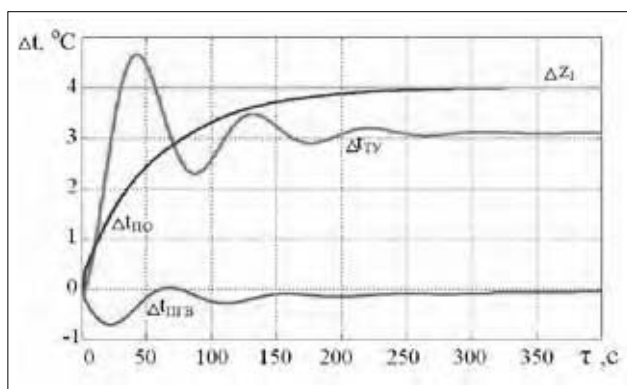


Рис. 5. Переходный процесс регулирования температур ТК при действии возмущений $\Delta t_{\text{ВОЗД}} = -3^\circ\text{C}$ и $\Delta t_{\text{ХВС}} = -3^\circ\text{C}$

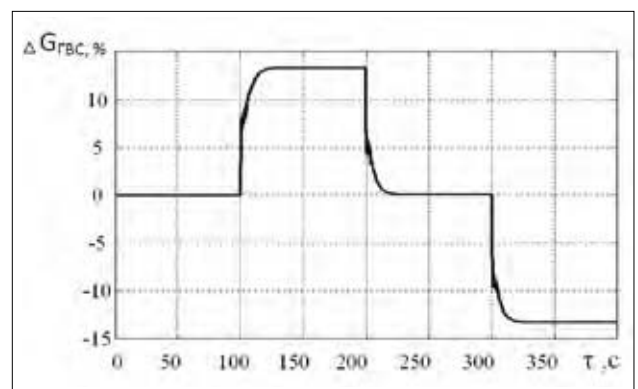


Рис. 6. Моделирование колебаний потребления горячей воды в сети ГВС

($y_2 = t_{\text{пгв}}$) осуществляется с помощью цифровых ПИ-регуляторов, уравнения которых имеют вид (5):

$$u_i = u_{i-1} + k_1 \cdot e_i + k_2 \cdot e_{i-1}$$

$$e_i = z_i - y_i$$

$$k_1 = K_p$$

$$k_2 = K_p \cdot \left(\frac{\Delta t}{T_{\text{и}}} - 1 \right).$$

Таким образом, замкнутая система регулирования включает нелинейную модель объекта и модель ПИ-регуляторов, с рассчитанными настройками K_p и $T_{\text{и}}$, задание регулятору $z_1 = f(t_{\text{возд}})$ определяется в соответствии с выражением (4), а $z_2 = 65^\circ\text{C}$, в соответствии со СНиП 2.04.01.

Структурная схема разработанной системы автоматического управления представлена на рис. 4.

Указанное возмущение по температуре воздуха приводит к изменению задания по температуре воды в сеть потребителей отопления (задание увеличивается на $\Delta z_1 = +4^\circ\text{C}$). Переходной процесс по заданию в подогревателе отопления длится менее 3 минут (178 с). Одновременное возмуще-

ние по температуре воды в сети ХВС приводит к отклонению температуры воды в сети горячего водоснабжения $\Delta t_{\text{пгв}}$. Данное возмущение отрабатывается регулятором менее чем за 5 минут, а максимальное отклонение температуры воды в сети ГВС составляет менее 1°C , что отвечает нормам для жилых домов.

Также на рис. 5 показано поведение третьего параметра состояния (пурпурная кривая) – отклонение температуры теплоносителя на выходе теплоутилизатора. Указанные возмущения привели к открытию клапана дымовых газов, подаваемых в тепловой комплекс, а также клапана подачи теплоносителя в ПО для стабилизации температур воды в сети отопления и горячего водоснабжения.

Также исследовалось влияние потребления воды в сети ГВС на температуру воды на выходе подогревателя горячей воды, возмущаемой температурой смеси обратной воды сети ГВС и воды сети ХВС, добавляемой для восстановления заданного расхода и давления в сети горячего водоснабжения. На рис. 6 представлены результаты моделирования колеба-

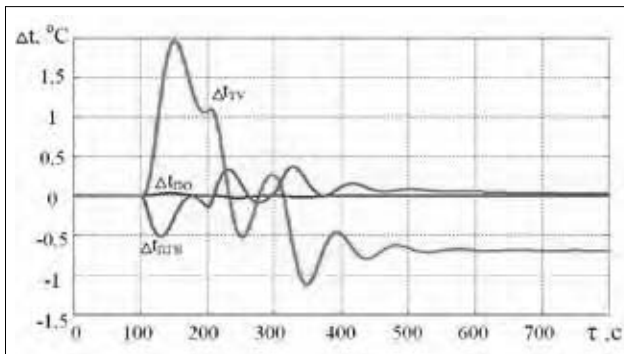


Рис. 7. Переходний процес регулювання температур ТК при действии возмущений со стороны потребления воды в сети ГВС

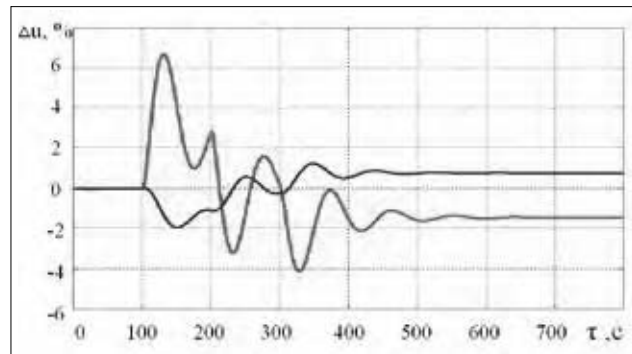


Рис. 8. Управляющее воздействие САУ теплового комплекса (красный – расход дымовых газов, синий – расход теплоносителя в ПО)

ний потребления горячей воды (в диапазонах $\pm 13\%$ от номинального). Переходные процессы регулирования в тепловом комплексе, вызванные данным возмущением, представлены на рис.7. Также исследовалось влияние потребления воды в сети ГВС на температуру воды на выходе подогревателя горячей воды, возмущаемой температурой смеси обратной воды сети ГВС и воды сети ХВС, добавляемой для восстановления заданного расхода и давления в сети горячего водоснабжения. На рис. 6 представлены результаты моделирования колебаний потребления горячей воды (в диапазонах $\pm 13\%$ от номинального). Переходные процессы регулирования в тепловом комплексе, вызванные данным возмущением, представлены на рис.7.

Анализ переходных процессов регулирования показывает, что температура воды в сети ГВС стабилизируется регулятором расхода дымовых газов при изменении потребления горячей воды на бытовые нужды. В свою очередь, этот переходной процесс вносит незначительные возмущения в сети отопления, которое обрабатывается регулятором расхода теплоносителя в подогреватель отопления (рис. 8).

Таким образом, после проведения дополнительных исследований работы разработанной системы управления процессами теплопередачи в контуре генерации тепловой энергии КЭУ была

доказана эффективность ее работы. САУ инвариантна к возмущению по температуре воздуха, так как разработанная математическая модель объекта учитывает зависимость температуры теплоносителя на выходе в сеть отопления от температуры окружающей среды, а система регулирования переводит объект на новое задание.

Отклонения температуры в сети ХВС и расхода в сети ГВС от номинальных обрабатываются регулятором расхода дымовых газов, температура в сеть отопления при этом корректируется регулятором расхода теплоносителя в подогревателе отопления.

Выводы. Разработана автоматическая система регулирования тепловых потоков КЭУ, обеспечивающая стабильные температуры теплоносителей в сети отопления и горячего водоснабжения. Положенная в основу САУ нелинейная математическая модель позволяет исследовать работу системы при действии различных возмущений. Среди них возмущения, связанные с отклонениями температуры дымовых газов как основного теплоносителя теплового комплекса, температуры воздуха, задающей температуру воды на выходе в сеть отопления. Промоделированы процессы изменения расхода воды потребителями системы горячего водоснабжения, при этом САУ обеспечивает заданные СНиП отклонения температур воды в сети ГВС и отопления.

Список литературы:

1. Бундюк А.М., Уліцька О.О. Розробка алгоритму для розрахунку статички когенераційної енергетичної установки. Холодильна техніка і технологія. 2013. № 3(143). С. 34–40.
2. Тодорцев Ю.К., Тарахтий О.С., Бундюк А.Н. Выбор экономической схемы генерации тепла когенерационной энергетической установки. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 2 (74). С. 17–22.
3. Денисова А.Е., Мазуренко А.С., Денисова А.С. Повышение эффективности взаимодействия парогазовых когенерационных установок с системой теплоснабжения. Проблемы региональной энергетики. 2015. № 2(28). С. 88–97.

4. Sengül M., Yörükeren N. Modeling and Simulation of the Combined Heat and Power Plant of Real Industrial System. 33rd IASTED International Conference on Modeling, Identification and Control Innsbruck. 2002.
5. Sun T., Lu J., Li Z. Modeling Combined Heat and Power Systems for Microgrid Applications. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. № 9. P. 4172–4180.
6. Когенерационные установки. Киев, 2015. URL: <https://nvp-vital.com/kogeneraciya> (дата обращения 20.07.2018).
7. Бланарь П.Г., Бундюк А.Н., Улицкая Е.О. Разработка математической модели и анализ динамики контура генерации тепловой энергии когенерационной установки. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2018. Том 29(68) Ч. 1. № 3. С. 95–100.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ КОНТУРУ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

Когенерація є популярною серед приватних та комерційних споживачів. Когенераційні установки можуть суттєво зменшити капітальні витрати на електроенергію та опалення. В статті розглядається питання синтезу системи управління теплового комплексу когенераційної установки, в який входять системи гарячого водопостачання та опалення. Модель об'єкта управління описується системою нелінійних рівнянь. Розроблена система управління складається з двох ПІ-регуляторів, які змінюють витрату димових газів, що надходять до теплоутилізатора, та розподіляють витрату теплоносія між підігрівачем опалення та підігрівачем гарячої води. Проведено дослідження системи автоматичного управління при дії різноманітних збурень із боку зміни температури димових газів, коливань витрати води, що споживається в системі гарячого водопостачання, та температури води, що надходить до системи гарячого водопостачання. Перевагою розробленої системи управління є інваріантність до збурень із боку коливань температури повітря, яка впливає на зміну завдання регулятора температури теплоносія в системі опалення.

Ключові слова: когенераційна установка, система автоматичного управління, нелінійна модель, газо-водяний теплообмінник, водо-водяний теплообмінник.

DESIGN OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF COMBINED HEAT AND POWER PLANT THERMAL ENERGY GENERATION CIRCUIT

Cogeneration is popular among private and commercial consumers. Cogeneration units can significantly reduce capital costs for electricity and heating. The article is focused on the issue of control system synthesis of combined heat and power plant thermal energy generation circuit, which includes hot water supply and heating system. The model of the control object is described by a system of nonlinear equations. The developed control system consists of two PI regulators that change the flow of flue gases entering the heat utilizer and distribute the coolant flow between the heating heater and the hot water heater. The research of automatic control system under the influence of various perturbations like changes in the temperature of flue gases, fluctuations in the flow of water consumed in the hot water supply system and the temperature of water entering the hot water supply system has been carried out. The advantage of the developed control system is the invariance to perturbations caused by fluctuations in the air temperature, which affects the task change of the temperature regulator of the coolant in the heating system

Key words: CHP-plant, automation control system, nonlinear model, gas-water heat exchanger, water-and-water heater.