

УДК 681.51

Бланарь П.Г.

Одесский национальный политехнический университет

Бундюк А.Н.

Одесский национальный политехнический университет

Улицкая Е.О.

Одесский национальный политехнический университет

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ КОНТУРА ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Показана актуальность применения когенерационных энергетических установок малой мощности как альтернативных источников снабжения теплом, электричеством и горячего водоснабжения. В статье предложена математическая модель динамики участка утилизации выхлопных газов и участка теплопередачи в пользовательскую сеть когенерационной энергетической установки с тепловым двигателем в виде двигателя внутреннего сгорания. Эти участки образуют тепловые аккумуляторы энергии, к которым относятся газо-водяной теплообменник теплоутилизатора, водо-водяной подогреватель отопительной сети и водо-водяной подогреватель сети горячего водоснабжения. Представленная нелинейная математическая модель позволяет исследовать динамические свойства участка потребителей тепла, производимой когенерационной установкой в широком диапазоне нагрузок. Модель учитывает влияние изменения температуры наружного воздуха на формирование задания температуры воды теплоносителя, подаваемого в сеть потребителей отопления.

Ключевые слова: когенерационная установка, автоматизация, нелинейная модель, газо-водяной теплообменник, водо-водяной теплообменник.

Постановка проблемы. Энергонезависимость и энергоэффективность как стратегическое направление построения и реконструкции производственных предприятий обусловило рост применения когенерационных энергетических установок (далее – КЭУ). Совместное производство тепловой и электрической энергии практикуется отечественными энергетиками уже давно, поскольку позволяет значительно увеличить эффективность использования топлива. 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.

Постановка задания. Целью статьи является разработка математического описания и анализ

процессов передачи тепловой энергии потребителям тепла и горячей воды, производимой КЭУ с двигателем внутреннего сгорания (далее – ДВС) в качестве теплового двигателя.

Анализ последних исследований и публикаций. В когенерационных установках для выработки тепловой энергии используются выхлопные газы двигателей различного строения, которые через теплообменник отдают энергию в магистраль. В зарубежной практике подобные системы имеют название СНР-plant (Combined Heat and Power plant – завод по совместному производству тепла и электроэнергии). Исследованию и моделированию таких систем уделено внимания во многих научных работах. Расчеты технико-экономических показателей КЭУ подтверждают их высокую экономичность [1]. Для значительного количества потребителей энергетической продукции наиболее привлекательными являются КЭУ с тепловыми двигателями в виде ДВС. Модели-

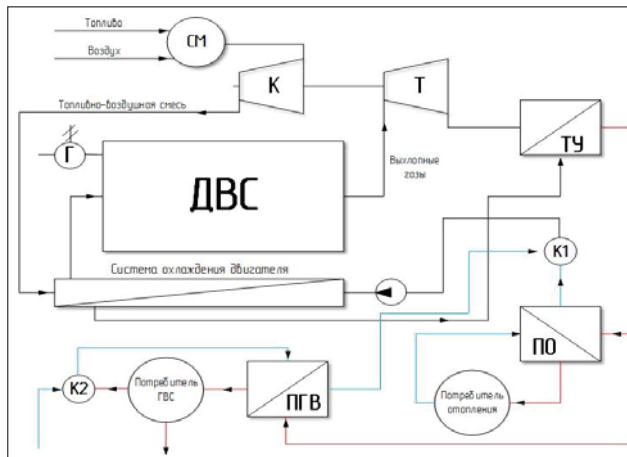


Рис. 1. Структурная схема когенерационной энергетической установки

СМ – смеситель;
К – компрессор;
Т – турбина;
ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
Г – генератор;
ТУ – теплоутилизатор;
ПО – подогреватель отопления;
ПГВ – подогреватель горячего водоснабжения;
ГВС – горячее водоснабжение;
К1, К2 – коллекторы.

рование динамики топливно-воздушного тракта КЭУ с ДВС проведено в работе [2]. В статье [3] приведена модель когенерационной установки, полученная без составления уравнений, с помощью пакета ThermosysPro, входящего в среду Dymola (Dynamic Modeling Laboratory), являющегося инструментом для моделирования систем. Моделированию когенерационной установки на алгоритмическом языке Visual Basic с использованием технологий объектно-ориентированного программирования посвящена работа [4], сделаны выводы о необходимости согласования графиков электрической и тепловой нагрузок когенерационной установки с соответствующими нагрузками потребителя. В статье [5] доказана важность рассмотрения процесса теплообмена при моделировании КЭУ, используемых для централизованного теплоснабжения, особенно когда они работают в режимах, значительно отличающихся от номинальных. Однако динамика контура генерации тепловой энергии КЭУ изучена не в полном объеме. Таким образом, разработка математической модели теплового контура (далее – ТК) и исследование его динамических свойств является актуальным вопросом.

Изложение основного материала исследования. Главным фактором, заставляющим переходить на альтернативные средства снабжения теплом и электроэнергией, является изношен-

ность тепло- и электросетей, а также низкое качество электроэнергии. Этой альтернативой стали когенерационные установки малой мощности, так называемые мини-ТЭЦ, способные обеспечить тепловой и электрической энергией отдельные здания или предприятия [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.

Общий КПД когенерационной установки при этом определяется из суммы электрической и тепловой полезной энергии.

Тепло, получаемое от выхлопных газов двигателя, может быть использовано для генерации пара, необходимого в текстильной, пищевой, бумажной и химической промышленности. Тепло, получаемое от охлаждения смазочного масла двигателя, его водяной рубашки и воздушного охлаждения, может быть использовано для подогрева воды, например, в сети централизованного теплоснабжения и горячего водоснабжения. Общая структурная схема рассматриваемой КЭУ представлена на рис. 1.

Выхлопные газы после ДВС направляются через систему турбонаддува в теплоутилизатор, где, являясь греющей средой, передают свою тепловую энергию теплоносителю – нагреваемой воде для систем отопления и горячего водоснабжения.

В статье ставится задача разработки математического описания процессов передачи тепловой энергии потребителям тепла и горячей воды, производимой КЭУ с ДВС.

Для большей наглядности на рис. 2 изображены основные аппараты и выделены технологические параметры, определяющие динамику рассматриваемой системы.

К внешним возмущающим параметрам относятся:

- температура и расход выхлопных газов на входе в ТУ (t_1 и G_1);
- температура обогреваемой воды на входе в теплоутилизатор (t_3);
- температура обогреваемой среды на входе в водо-водяной подогреватель отопительной сети (t_4);

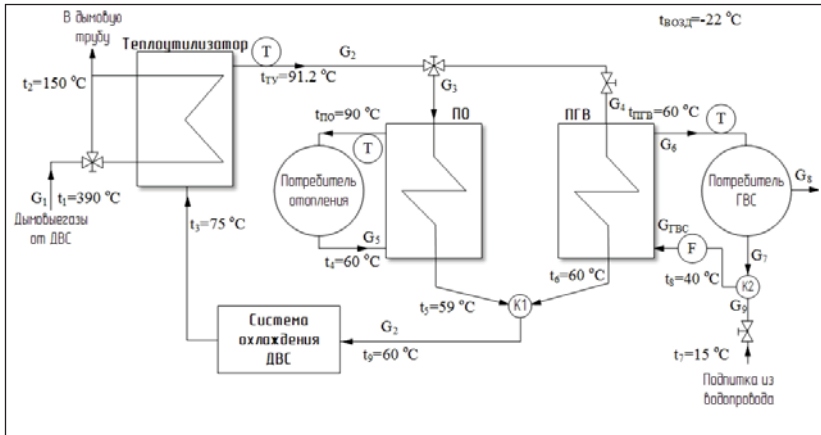


Рис. 2. Структурная схема рассматриваемого участка

– температура обогреваемой среды на входе в водо-водяной подогреватель горячего водоснабжения (t_8).

К регулируемым параметрам системы относятся:

– температура обогреваемой воды на выходе теплоутилизатора (t_{TY});

– температура обогреваемой среды на выходе водо-водяного подогревателя отопительной сети ($t_{ПО}$);

– температура обогреваемой среды на выходе водо-водяного подогревателя горячего водоснабжения ($t_{ПГВ}$);

– расход обогреваемой среды на входе в водо-водяной подогреватель горячего водоснабжения после коллектора K2 ($G_{ГВС}$).

В рассматриваемом участке выделены следующие каналы регулирования:

– расход дымовых газов ($G_1 \rightarrow t_{TY}$);

– расход воды для подогревателя отопления ($G_3 \rightarrow t_{ПО}$);

– расход воды для системы ГВС ($G_4 \rightarrow t_{ПГВ}$);

– расход воды для подпитки системы ГВС ($G_9 \rightarrow G_{ГВС}$).

Система нелинейных уравнений, описывающих динамику контура генерации тепловой энергии когенерационной установки, имеет вид:

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

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

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

Массы рабочих веществ, находящихся в теплообменных аппаратах (m_{TY} , $m_{ПО}$, $m_{ПГВ}$), определяются в результате конструктивного расчета тепло-

обменных аппаратов, выполненных по методике [7].

Расход воды $G_{ГВС}$ после коллектора K2 определяется как сумма расходов воды подпитки (G_9) и неиспользованной воды из сети горячего водоснабжения (G_7). Расход воды для нужд потребителей обозначен как G_8 .

Требуемое значение температуры воды, подаваемой в сеть потребителей отопления в зависимости от наружной температуры воздуха, определяется по зависимости (4), а ее графическое представление имеет вид (рис. 3):

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

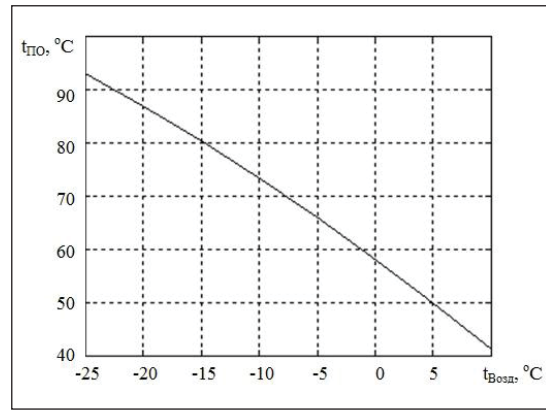


Рис. 3. Температурный график для системы отопления

Теплоемкость (Cp_{ii} , кДж/(кг·°C)) и плотность воды (ρ_{ii} , кг/м³) как основного теплоносителя системы горячего водоснабжения и отопления, в зависимости от температуры t_i определяется выражениями вида (5–6):

$$Cp_{ii} = -1.7 \cdot 10^{-6} \cdot t_i^3 + 1.6 \cdot 10^{-4} \cdot t_i^2 - 6.3 \cdot 10^{-3} \cdot t_i + 4.26 \quad (5)$$

$$\rho_{ii} = -1.45 \cdot 10^{-6} \cdot t_i^4 + 4.75 \cdot 10^{-4} \cdot t_i^3 - 8.3 \cdot 10^{-2} \cdot$$

$$\cdot t_i^2 + 0.87 \cdot t_i + 999 \quad (6)$$

Таким образом, система дифференциальных уравнений (1) – (3) совместно с алгебраическими уравнениями (4) – (6) составляют математическое описание динамики теплообменного оборудования, работающего в составе теплового контура когенерационной установки. В результате решения системы уравнений методом Эйлера с шагом дискретности 1 были получены кривые разгона ТК при различных возмущениях. Стоит отметить, что приведенная модель позволяет исследовать

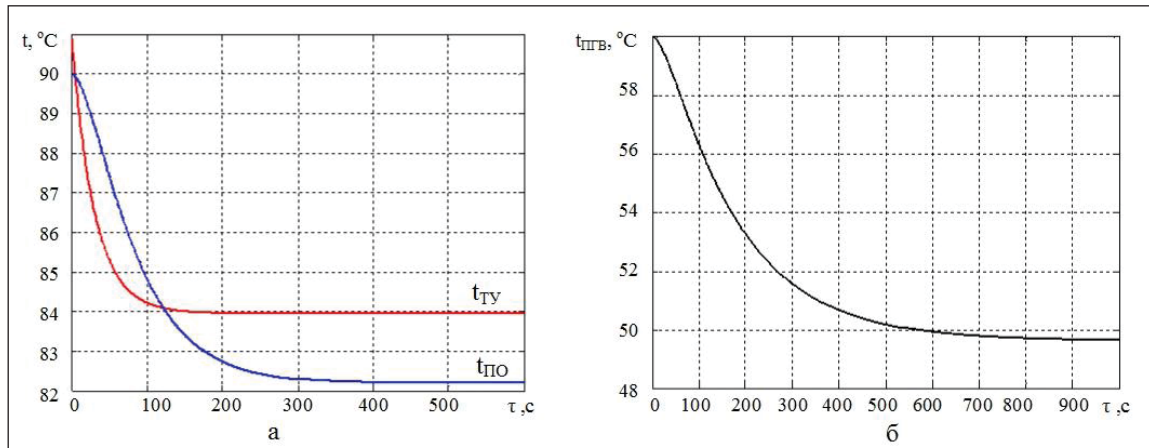


Рис. 4. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе теплоутилизатора и подогревателя отопления (а), а также на выходе подогревателя сети ГВС (б) при изменении расхода дымовых газов

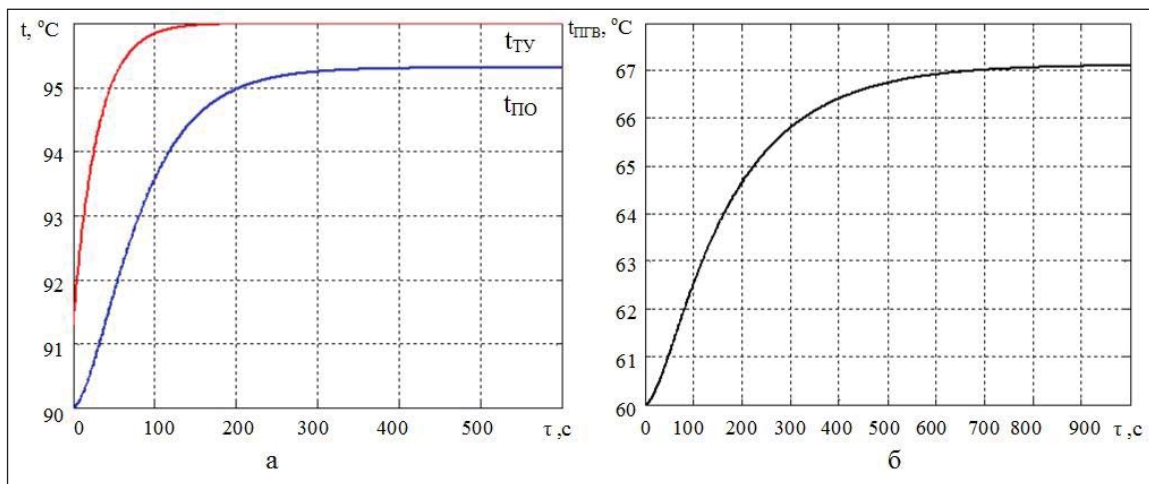


Рис. 5. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе теплоутилизатора и подогревателя отопления (а), а также на выходе подогревателя сети ГВС (б), при изменении температуры теплоносителя на входе теплоутилизатора

динамику ТК при существенных отклонениях параметров от их номинальных значений.

На рис. 4 приведены результаты моделирования ТК при возмущении по управляющему воздействию изменения расхода дымовых газов $\Delta G_1 = -40\%$, производимых при сжигании топлива в двигателе внутреннего сгорания КЭУ. При этом температура нагреваемой воды после теплоутилизатора снизилась на 5°C , после подогревателя отопления на $7,8^\circ\text{C}$, а после ПГВ более чем на 10°C .

Изменение температуры теплоносителя на входе в теплоутилизатор также влияет на его выходные параметры. Так, на рис. 5 приведены кривые разгона выделенных параметров ТК при увеличении на 5°C температуры обогреваемой воды на входе в теплоутилизатор (t_3), что приводит к увеличению температуры на выходе тепло-

утилизатора на 5°C , в сети отопления на $5,3^\circ\text{C}$ и в сети ГВС на 7°C .

Влияние расхода воды, потребляемой из сети ГВС и температуры подпиточной воды, подаваемой в коллектор К2 для поддержания номинального расхода горячей воды, представлено на рис. 6а и 6б соответственно. Увеличение потребления горячей воды в сети ГВС (ΔG_g) на 10% приводит к понижению ее температуры на $5,7^\circ\text{C}$, а увеличение температуры подпиточной воды (Δt_7) на 5°C влечет рост температуры воды, подаваемой в сеть ГВС примерно на 5°C .

Исследования возмущающих воздействий в сети ГВС показали, что к большему отклонению температуры воды, подаваемой в сеть, приводит уменьшение, нежели аналогичное увеличение ее потребления (рис. 7).

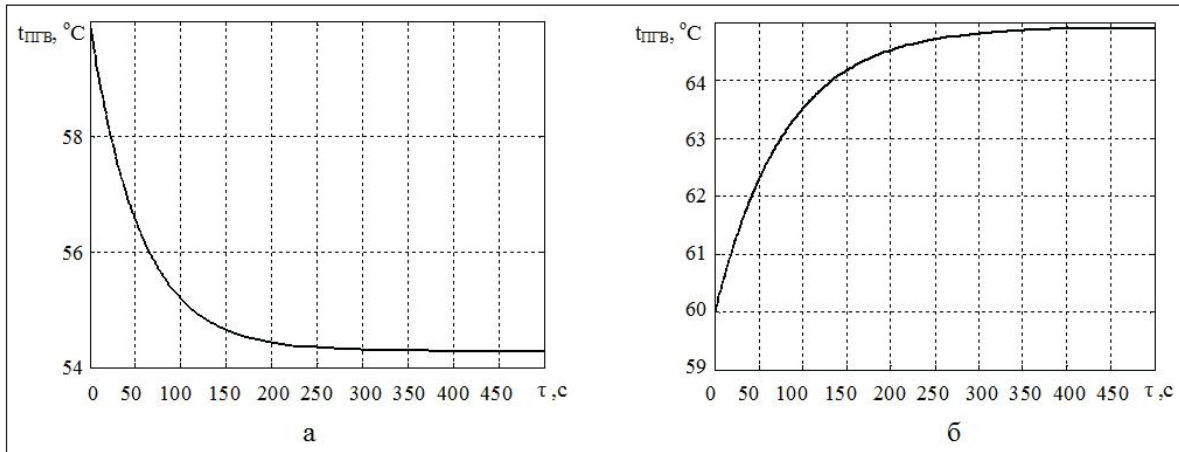


Рис. 6. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе подогревателя сети ГВС при изменении расхода потребляемой воды сети ГВС (а) и температуры подпиточной воды (б)

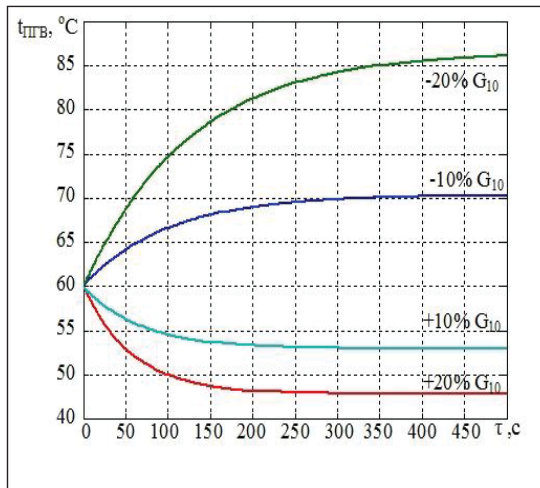


Рис. 7. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе подогревателя сети ГВС при различных изменениях расхода потребляемой воды сети ГВС

Эта нелинейность в реакции ТК на указанное возмущение является характерной чертой применения нелинейных математических моделей при описании динамических свойств объектов автоматизации. В частности, различия в реакции на возмущение по расходу воды потребляемой в сети ГВС на температуру $t_{ПГВ}$ обуславливается видом нелинейного дифференциального уравнения (3).

На рис. 8 отражена реакция теплового контура на возмущение по управляющему воздействию $\Delta G_3 = -10\%$ от номинального расхода воды на подогреватель отопления, что, в свою очередь, увеличивает расход воды в сеть ПГВ на 20% ($\Delta G_4 = +20\%$). Указанные возмущения уменьшают температуру теплоносителя в сети ПО на 3,5°C и увеличивают температуру теплоносителя в сети ПГВ почти на 8°C.

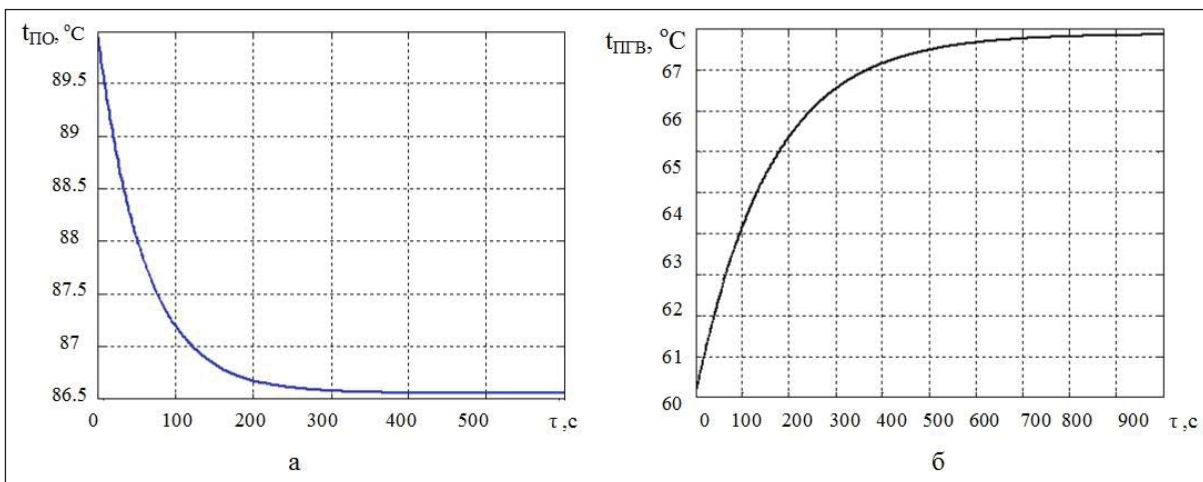


Рис. 8. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе подогревателя отопления (а) и на выходе подогревателя сети ГВС (б), при уменьшении расхода греющей воды ПО

Выводы. Разработана математическая модель теплового контура КЭУ, которая позволяет провести анализ его динамических свойств при возмущающих и регулирующих воздействиях. В результате проведенного анализа влияния внешних возмущений определены разгонные кривые

теплового контура КЭУ как объекта регулирования температур: $t_{ТЭ}$, $t_{ПО}$, $t_{ПВ}$.

Разработанное математическое описание будет использовано для дальнейшего синтеза системы автоматического регулирования тепловых потоков КЭУ.

Список литературы:

1. Бундюк А.М., Улицька О.О. Розробка алгоритму для розрахунку статичної когенераційної енергетичної установки. Холодильна техніка і технологія. 2013. № 3 (143). С. 34–40.
2. Бундюк А.Н., Улицкая Е.О., Ларионова О.С. Моделирование динамики топливно-воздушного тракта когенерационной энергетической установки. Праці Одеського політехнічного університету. 2014. № 2 (44). С. 122–128.
3. Deneux O. Establishment of a Model for a Combined Heat and Power Plant with Thermosys Pro Library. Procedia Computer Science. 2013. № 19. P. 746–753.
4. Мазуренко А.С., Баласанян Г.А., Сычова Е.А. Эффективность регулирования отпуска теплоты когенерационной газотурбинной установкой. Праці Одеського політехнічного університету. 2005. № 6. С. 108–112.
5. Yuanhang D., Chen L., Yong M. Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer. Process IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2017. № 8. P. 1225–1236.
6. Панык В. Когенерация: как это работает. Обзор рынка. Сети и бизнес. 2010. № 4 (53). С. 96–101.
7. Бундюк А.М. Розрахунки конструктивних характеристик теплообмінних апаратів: навч. посіб. Одеса: ОНПУ, 2013. 24 с.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ Й АНАЛІЗ ДИНАМІКИ КОНТУРА ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

Показана актуальність застосування когенераційних енергетичних установок малої потужності як альтернативних джерел постачання теплом, електрикою і гарячого водопостачання. У статті запропоновано математичну модель динаміки ділянки утилізації вихлопних газів і ділянки теплопередачі у призначену для користувача мережу когенераційної енергетичної установки з тепловим двигуном у вигляді двигуна внутрішнього згоряння. Ці ділянки утворюють теплові акумулятори енергії, до яких належать газоводяний теплообмінник теплоутилізатора, водо-водяний підігрівач опалювальної мережі та водо-водяний підігрівач мережі гарячого водопостачання. Представлена нелінійна математична модель дозволяє досліджувати динамічні властивості ділянки споживачів тепла, виробленої когенераційною установкою в широкому діапазоні навантажень. Модель враховує вплив зміни температури зовнішнього повітря на формування задавання температури води теплоносія, що подається в мережу споживачів опалення.

Ключові слова: когенераційна установка, автоматизація, нелінійна модель, газо-водяний теплообмінник, водо-водяний теплообмінник.

DESIGN OF THE MATHEMATICAL MODEL AND DYNAMICS ANALYSIS OF COMBINED HEAT AND POWER PLANT THERMAL ENERGY GENERATION CIRCUIT

The relevance of low-power combined heat and power plant (CHP-plant) as alternative heat, electricity and hot water supply source is presented. This paper proposes dynamics mathematical model of exhaust gases utilization area and the heat transfer section into the consumer network CHP-plant with a thermal engine in the form of an internal combustion engine. These sections form thermal energy accumulators, which include a gas-water heat exchanger; a water-and-water heater of the heating network and a water-and-water heater of the hot water supply network. The presented nonlinear mathematical model allows to investigate the dynamic properties of the heat consumers section produced by the cogeneration unit in a wide range of loads. The model takes into account the influence of the change in the outside air temperature in the formation of the water temperature setting of the coolant supplied to the heating consumers network.

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