



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ**

**Факултет по машиностроене и уредостроене
Катедра „Механика“**

маг. инж. Надежда Димитрова Василева

**МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХИБРИДНИ ТОПЛИННИ
СИСТЕМИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"**

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.4. „Енергетика“

Научна специалност: „Енергопреобразуващи технологии и системи“

**Научни ръководители: проф. д-р инж. Р. Попов и
проф. д.н. инж. Ал. Георгиев**

ПЛОВДИВ, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Механика“ към Факултет по машиностроене и уредостроене на ТУ-София, филиал Пловдив на редовно заседание, проведено на 03.04.2025г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 16.09.2025 от 14:00h часа в зала 4425 на Технически университет – София, филиал Пловдив на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ- 5.4-15.22.2025 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Въльо Николов Николов – председател
2. доц. д-р инж. Георги Делчев Томов – научен секретар
3. проф. д.н. инж. Станислава Цанкова Ташева
4. проф. д-р Виолета Димитрова Рашева
5. проф. д-р инж. Тодор Георгиев Джурков

Рецензенти:

1. проф. д.н. инж. Станислава Цанкова Ташева
2. доц. д-р инж. Георги Делчев Томов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по машиностроене и уредостроене на ТУ-София, филиал Пловдив, корпус IV, кабинет № 4240.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Механика“ на факултет по машиностроене и уредостроене на ТУ-София, филиал Пловдив. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Надежда Димитрова Василева

Заглавие: Моделиране и изследване на хибридни топлинни системи.

Тираж: 30 броя

Отпечатано в „Миленкови“ ООД

Актуалност на проблема

В световен мащаб предизвикателствата, свързани с добива на енергия и енергийната ефективност, поставят хибридните топлинни системи (ХТС) в центъра на все повече научни изследвания. При комбиниране на различни възобновяеми енергийни източници, които работят при променящи се природни условия се получават хибридни системи. ХТС използват оптимално зелената енергия, която получават - това е тяхното голямо преимущество, което прави изследванията и работата с тези системи много актуални.

Бързите темпове на развитие на ХТС налагат по-прецизни методи за анализ и оптимизация, чрез които да се постигне повишаване на ефективността на системите и намаляване на въглеродните емисии.

Съществуват различни методи за изследване на ХТС чрез симулации, но сложността на този тип системи изисква непрекъснато усъвършенстване на моделите им.

В настоящото изследване са разработени и валидирани симулационни модели, чрез които още в етап на разработване може да се предвиди поведението на ХТС с висока точност. Изследването доказва приложимостта на симулационните изследвания на ХТС като финансово изгоден начин за анализ на топлинните им характеристики и енергийната им ефективност. С промяната на климатичните особености в световен мащаб ХТС се нуждаят от ефективно оценяване, за да се предвиди поведението им в зони с разнообразен климат.

Благодарение на комерсиалния софтуер TRNSYS Simulation Studio са приложени успешно математични модели и симулационни експерименти, чрез които настоящото изследване създава солидна основа за оптимизиране на ХТС. Чрез получените резултати от софтуерът може да се правят подобрения, с които да се намали енергийният разход и да се подобри енергийната ефективността на сградата, освен това може да се намалят емисиите на въглероден диоксид, което подобрява опазването на околната среда.

Тези фактори правят изследването актуално и значимо, като е насочено към устойчивостта и ефективното оползотворяване на енергийните ресурси.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е да се създаде и валидира симулационен модел на функционирането на хибридна топлинна система, позволяващ реализирането на различни режими на работа и действащ при различни климатични условия.

В съответствие с поставената цел в настоящия труд следва да се решат следните задачи:

1. Създаване, с помощта на подходяща програмна среда, на математични модели на компонентите на ХТС, такива като например слънчеви колектори, термопомпи, буферни резервоари, топлообменници и др.;

2. Създаване на математични модели на функционирането на хибридната топлинна система в различни режими на работа;

3. Валидиране на създадените модели на ХТС с използването на данни от експериментални изследвания. За да бъде валидиран моделът на даден режим, трябва да се сравнят резултатите от симулациите с реални експериментални данни, събрани от инсталацията за същия режим. Това е критичен етап, който доказва, че моделите адекватно отразяват реалната работа на системата.;

4. Създаване и тестване на симулационен модел на функционирането на цялата хибридна топлинна система, позволяващ реализирането на различните режими на работа и действащ при различни климатични условия.

Научна новост

Създаден е прецизен симулационен модел на ХТС, като е направено и валидиране, базирано на реални експериментални данни. Валидирането позволява извършването на надеждна оценка на ефективността на системата при различни режими на работа. Това представлява новост, защото съществуващите модели често не включват комплексна валидация, сравнена с реални измервания.

Оптимизиране на работата на ХТС, като се направи изследване на пет от режимите на работа на системата. Благодарение на това изследване може да се постигне по-гъвкаво управление на енергийните потоци в системата, а получените резултати могат да помогнат за по-успешно проектиране на ХТС адаптирани към разнообразните климатични условия.

Сравнителният анализ между различни географски региони (Пловдив и Хелзинки) показва влиянието на климатичните особености върху ефективността на ХТС. Това изследване дава нови данни за адаптивността на ХТС към различни климатични условия.

Комплексните топлинни процеси са моделирани чрез метода „сива кутия“, което позволява по-ефективно съчетание между теоретични и емпирични модели, което от своя страна води до по-реалистични симулации на работата на системата. Чрез прецизното прогнозиране на поведението на системата може да се направят подобрения на енергийната ефективност.

Тези научни новости допринасят за по-доброто разбиране на динамиката на хибридните топлинни системи и тяхното бъдещо развитие като устойчиви решения за отопление и охлаждане.

Практическа приложимост

Резултатите от дисертационния труд имат висока практическа стойност и могат да бъдат приложени в енергийния сектор, като чрез тях може да бъде направено оптимизиране на ХТС в сгради. ХТС могат да бъдат адаптирани към специфичните климатични особености и потребителски нужди, което подобрява ефективността им. Практическото внедряване на изследваните системи допринася за екологично устойчивото им развитие. Икономическите ползи са от съществено значение, защото чрез симулационното изследване на системите може да се намалят експлоатационните разходи още в етапа на проектиране.

Апробация

Дисертационният труд е докладван и обсъден на заседание на катедра „Механика“ при ТУ-София, филиал Пловдив. Разработените модели и методологии са апробирани чрез симулационни експерименти и сравнени с реални данни, получени от функционираща хибридна топлинна система в ТУ-София, филиал Пловдив. Етапи от дисертацията са докладвани и обсъждани на научни конференции, семинари и чрез публикации в рецензирани издания, свързани с енергийна ефективност и възобновяеми енергийни източници.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 7 броя статии, списък на които е поместен в края на автореферата.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 171 страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо (140) литературни източници, като (119) са на латиница и (10) на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо (79) фигури и (20) таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ОБОСНОВКА И ПОСТАНОВКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

В тази глава е направен анализ на достъпната литература по въпроса в областта като въз основа на направения обзор на проблемите са дефинирани основните цели и задачи на проекта за дисертационен труд.

1.1. Литературен обзор на компонентите, съставлящи ХТС

Представен е обширен обзор на основни компонентите, съставлящи ХТС. Направено е проучване на техните характеристики и особености, както и възможности за оптимизация. Разгледани са компоненти, свързани с подвеждането на топлинна енергия, устройства за акумулиране на топлинна енергия и спомагателни компоненти. Дадени са примери с експериментални ХТС в Турция, Китай, Италия, Испания, Канада, Швеция, Чили, Бразилия и Аржентина.

1.2. Литературен обзор на методи и средства за симулиране на ХТС

Направен е обзор на физичните процеси и математичното им представяне. Разгледани са методи за решаване на уравненията, като методите на крайните разлики, елементи и обеми. Моделирането и симулирането на сложни системи включва обикновено два етапа. На първия етап се създават математични модели на основните компоненти на системата, а на втория – модел на цялата система, като се отчита взаимодействието на отделните компоненти. При това пълният модел може да има йерархична структура и да ползва както методите за моделиране, базирани на използването на обикновени интегро-диференциални уравнения, така и тези, прилагащи методите на CFD.

Разгледани са само някои от най-често използваните: ANSYS fluent, COMSOL multiphysics, TRNSYS, HEATING, RADCOOL, DOE-2, BLAST, EnergyPlus, ESP-r, KoZiBu, BSim, PCM express, WUFI, EED, и др.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Създадени са множество методи за симулиране на сгради притежаващи хибридни топлинни системи. За създаване на симулациите се използват различни математични модели, например за конструиране на натоварването; за потребление на енергията и др. Математичните модели описват физическа система или компонент от система, като използват математичен език. Чрез тях системите и компонентите могат да се контролират и оптимизират. Те описват променливи, уравнения и връзката между тях.

2.1. Обект на изследването

В тази част са описани техническите характеристики на основните компоненти на експерименталната хибридна топлинна инсталация разположена в трети корпус на Технически университет – София, филиал Пловдив.

2.2. Избор на софтуерна среда за извършване на симулациите

За целите на провежданото изследване на нашето проучване е избран комерсиалния програмен пакет TRNSYS, който включва няколко интегрирани модула и голям набор от библиотечни модели: TRNSYS Simulation Studio; TRNExe ; TRNBuild; TRNEdit; TRNOPT и TESS libraries. TRNSYS е изключително гъвкава графично базирана софтуерна среда, използвана за симулиране на поведението на динамични системи. TRNSYS може еднакво добре да се използва за моделиране на сложни динамични системи.

2.3. Представяне на математичните модели на компонентите на хибридната система

В тази част са подбрани математични модели на основните компоненти в ХТС. Разгледани са математичните модели на плосък слънчев колектор, термopомпа „вода-вода“, вертикален топлообменник, многопластов резервоар за съхранение на течности, компонент за въвеждане на реални метеорологични данни, вентилаторен конвектор, циркулационна помпа, четец на данни, ефективна небесна температура и модел на сграда.

ГЛАВА 3. СЪЗДАВАНЕ НА СИМУЛАЦИОННИ МОДЕЛИ НА СИСТЕМАТА ПРИ РАЗЛИЧНИ РЕЖИМИ НА РАБОТА.

Данните необходими за валидирането на системата от модели са получени от експериментална хибридна топлинна инсталация, която се намира на територията на Технически университет – София, филиал Пловдив. В предходни изследвания на експерименталната хибридна топлинна инсталация са осъществени реални измервания на основните величини.

Основните компоненти на експерименталната инсталация са: слънчеви колектори – 3 броя в паралелна схема, вертикални топлообменници – 2 броя, термopомпа вода-вода, топлинни водни акумулатори – 200л и 300л, конвектор и измервателни прибори.

Фокусът в глава 3 е върху създаването на симулационни модели на петте режима на работа на ХТС, като след това получените данни биват валидирани на базата на предварително събрани данни от експериментални изследвания. Симулацията на системата и валидирането на симулационните модели осигуряват висока гъвкавост и възможност за изследване на функционирането на системата в различните и режими на работа.

Проведените експериментални изследвания от предишни изследвания осигуряват стабилна база за валидиране и впоследствие за оптимизиране на работата на инсталацията. Разгледани са

подробно техническите характеристики на основните компоненти на инсталацията, както и петте режима на работа

3.1. Данни от експерименталните изследвания на инсталацията

Инсталацията разгледана в дисертацията има възможност за работа в различни режими, като биват комбинирани компоненти от инсталацията. Конфигурациите от елементите зависят от необходимостта от отопление или охлаждане в зависимост от текущия сезон. Различните режими на работа са създадени, за да предоставят по-голяма ефективност на системата посредством своята устойчивост, гъвкавост и универсалност. Подобряването на ефективността води до намаляване на разходите от експлоатационно ниво.

3.1.1. Резултати от експериментално изследване в режим 1:

Задача на режима: Да съхранява топлинната енергия добита от слънчевите колектори във водните акумулатори на инсталацията.

Осъществимост на режима: Режимът е особено подходящ за работа през лятото, пролетта и есента. Възможно е режимът да се включи в експлоатация и през зимата при условие, че има достатъчно слънчева енергия през меки и ясни дни.

3.1.2. Резултати от експериментално изследване в режим 2:

Задача на режима: Вертикалните топлообменници поемат топлината идваща от слънчевите колектори. Това е необходимо, за да се подпомогне термopомпата като източник на отопление.

Осъществимост на режима: Режимът е подходящ само при наличието на много силна слънчева радиация, предимно през лятото.

3.1.3. Резултати от експериментално изследване в режим 3:

Задача на режима: Директно да подава топлина енергия към конвектора. Топлинната енергия се съхранява в водните резервоари, задължително условие на режима е температурата във водните резервоари да под 30 °C.

Осъществимост на режима: Режимът е подходящ при ниско потребление на отопление, предимно през преходните сезони.

3.1.4. Резултати от експериментално изследване в режим 4:

Задача на режима: Отопление на помещение, като се използва земно базирана термopомпа. В този режим енергията постъпва към изпарителя на термopомпата от единичния вертикален топлообменник и след това бива преобразувана към по-високо температурно ниво в самата термopомпа, като в следствие топлинната енергия бива подадена чрез кондензатора към конвектора.

Осъществимост на режима: Режимът е подходящ единствено и само през зимния сезон. Този режим на работа се използва, когато нуждата

от топлинна енергия е доста голяма, а другите източници на топлина са нефункционални.

3.1.5. Резултати от експериментално изследване в режим 5

Задача на режима: Чрез този режим се осъществява отопление на помещение, като топлинната енергия, необходима за тази цел, се набавя от слънчевите колектори и се натрупва във водният акумулатор, а след това се предава към термopомпата, за да осъществи отопление на помещения.

Осъществимост на режима: Режимът е подходящ през пролетта и есента. Използва се, когато температурата на флуида в 200 l, 300 l и 150 l (буфер) резервоари е спаднала под 30 °C. Режимът не трябва да се използва за дълги интервали от време на работа.

3.2. Симулиране и валидиране на моделите на режимите на работа на инсталацията

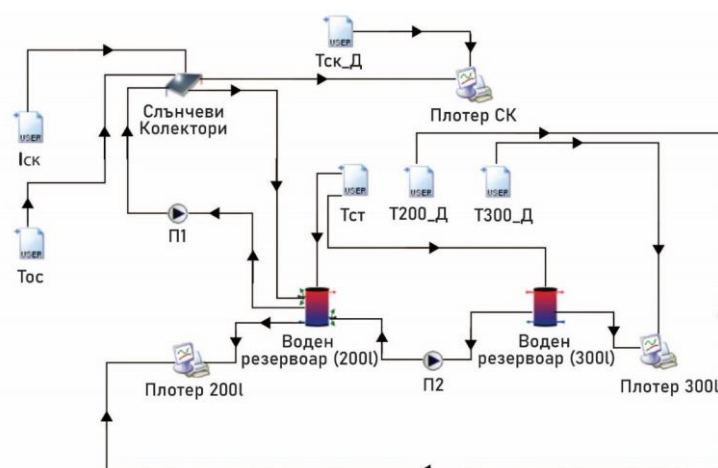
Симулациите на всички посочени режими са осъществени чрез комерсиален софтуер TRNSYS (studio). Компонентните модели и техните функции да описани поотделно в описанието на всеки един режим. Данните необходими за верификацията на режимите на работа са взети от реално изследване на разгледаната хибридна система.

Данните за стойностите на всички параметри са избрани на базата на техническите спецификации на производителите на оборудването и в съответствие с препоръките, дадени при описанието на математичните модели на тези компоненти в предишната глава 2.

Оценката между реалните данни и симулационните данни е направена на база средно квадратично отклонение, както и е изчислена процентната грешка спрямо осреднената стойност.

3.2.1. Симулационна схема и резултати от валидиране на режим 1

На фигура 3.6 е представена TRNSYS схема на работата на XTC в режим 1.



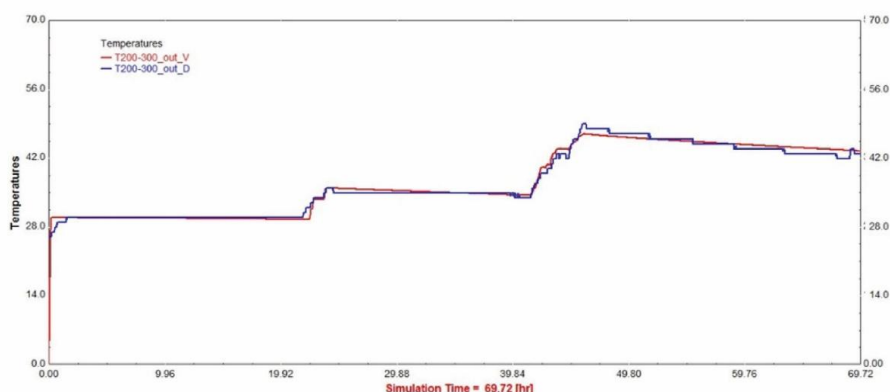
Фиг. 3.6. Симулационна схема на режим 1 в TRNSYS studio.

На графики 3.7, 3.8 и 3.9 са представени данните получени след валидиране на модела на режим 1 на системата. Данните от изследването са с продължителност $t = 4183 \text{ min}$, интервалите от време за запис на данните от реалното изследване е $\Delta t = 1 \text{ min}$.



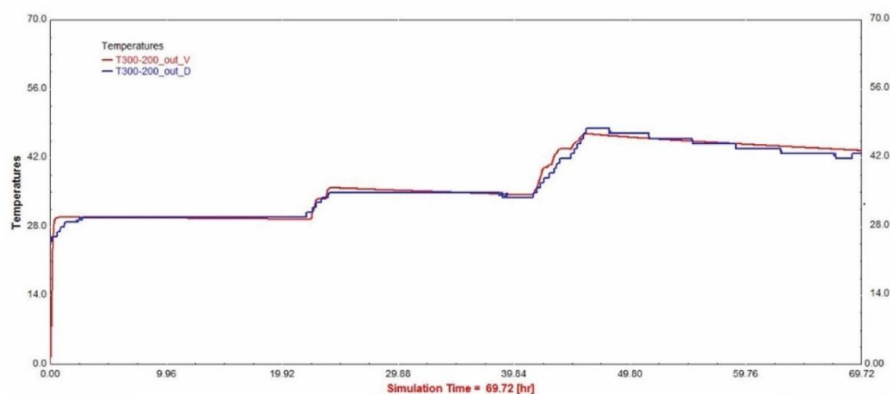
Фиг. 3. 7. Графика на температурата на изхода на слънчевите колектори

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 0.61^\circ\text{C}$. Процентното отклонение е 1.65%. Това е много добро съвпадение и означава, че верификацията е доста точна. Притежава незначителни пикове, основно при динамични преходи.



Фиг. 3.8. Графика на температурата на изхода на 200l воден резервоар

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.2^\circ\text{C}$. Процентното отклонение е 2.8%. Това е много добро съвпадение с малки отклонения и означава, че верификацията е доста точна.



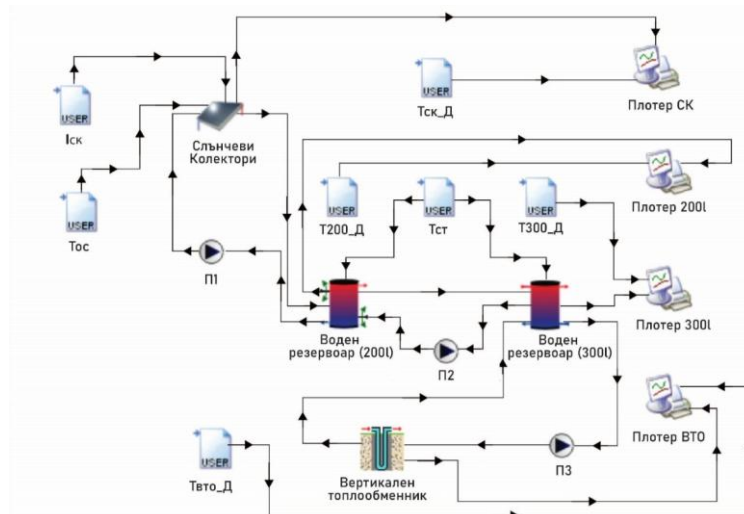
Фиг. 3.9. Графика на температурата на изхода на 300l воден резервоар

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.0^\circ\text{C}$. Изчисленото процентното отклонение е 2.4%. Верификацията и симулацията съвпадат отлично и графиката показва висока точност и надеждност на симулационния модел.

Като заключение може да се каже, че създаденият модел на режим 1 е устойчив и представя реалното поведение на системата. Разликите между верификацията и реалните данни са пренебрежимо малки.

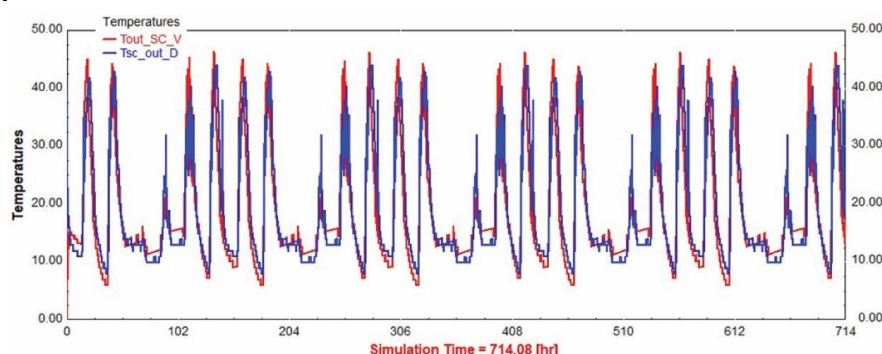
3.2.2. Симулационна схема и резултати от валидиране на режим 2

На фигура 3.10 е представена схема на режим 2 в комерсиалния софтуер TRNSYS.



Фиг. 3.10. Симулационна схема на режим 2 в TRNSYS studio.

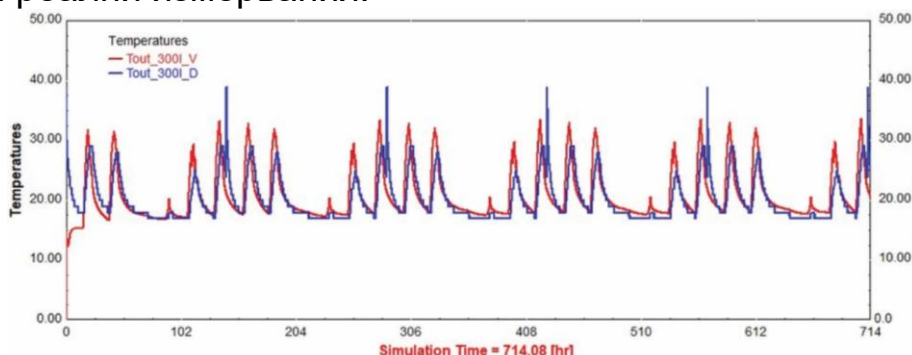
На графики 3.11, 3.12 и 3.13 са представени данните получени след валидиране на модела на режим 2 на системата. Данните от изследването са с продължителност един месец или $t = 42845 \text{ min}$, интервалите от време за запис на данните от реалното изследване е $\Delta t = 1 \text{ min}$.



Фиг. 3.11. Графика на температурата на изхода на слънчевите колектори.

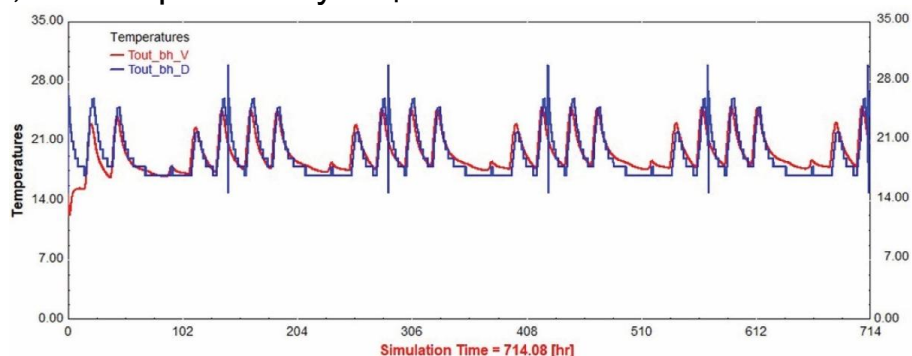
Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.20^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 3.4%. Това е много добро съвпадение, особено като се има предвид цикличния характер на процеса и означава, че верификацията е доста точна. Притежава незначителни пикове, основно при динамични преходи.

Отклоненията се появяват предимно във върховете, но се срещат и при преходите, което всъщност е очаквано поведение при динамични режими и реални измервания.



Фиг. 3.12. Графика на температурата на изхода на 300l воден резервоар.

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.10^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 4.15%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че въпреки отчетените циклични амплитуди и разликите в ритъма на колебания между данните от реалното изследване и симулацията те са сходни, което прави симулацията качествена.



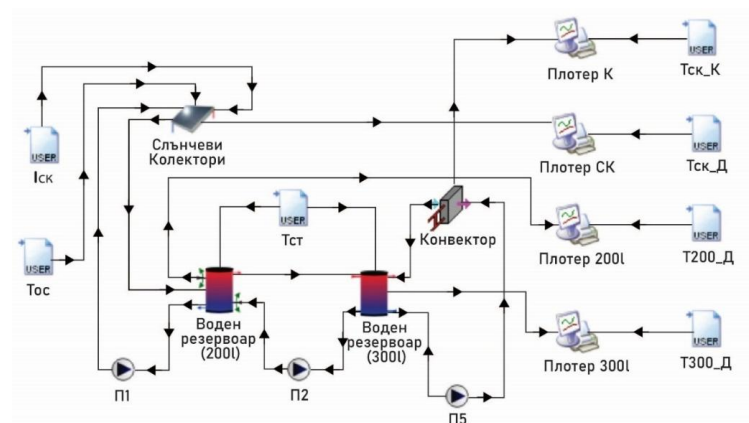
Фиг. 3.13. Графика на температурата на изхода на ВТО.

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.10^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 5.1%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че въпреки отчетените циклични амплитуди и разликите в ритъма на колебания между данните от реалното изследване и симулацията има много добро съвпадение.

Като заключение може да се каже, че създаденият модел на режим 2 е устойчив и представя реалното поведение на системата. Разликите между верификацията и данните от реалното изследване на системата са пренебрежимо малки.

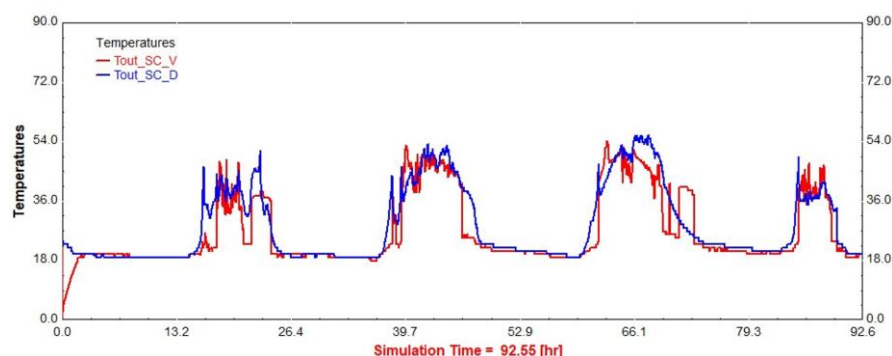
3.2.3. Симулационна схема и резултати от валидиране на режим 3

На фигура 3.14 е представена схема на режим 3 в комерсиалния софтуер TRNSYS.



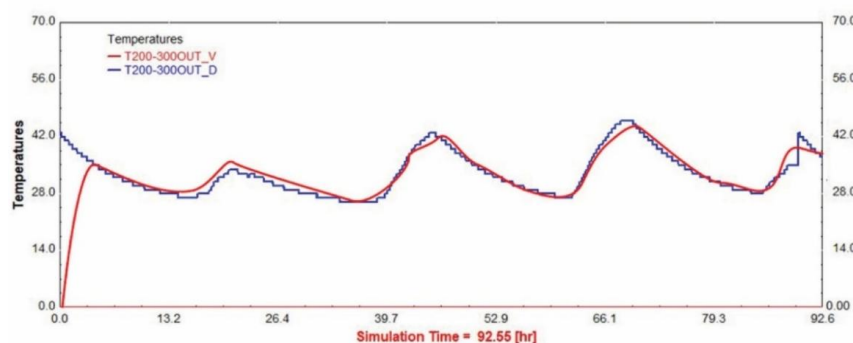
Фиг. 3.14. Симулационна схема на режим 3 в TRNSYS studio.

На графики 3.15, 3.16, 3.17 и 3.18 са представени данните получени след валидиране на модела на режим 3 на системата. Данните от изследването са с продължителност $t = 5553 \text{ min}$, интервалите от време за запис на данните от реалното изследване е $\Delta t = 1 \text{ min}$.



Фиг. 3.15. Графика на температурата на изхода на слънчевите колектори

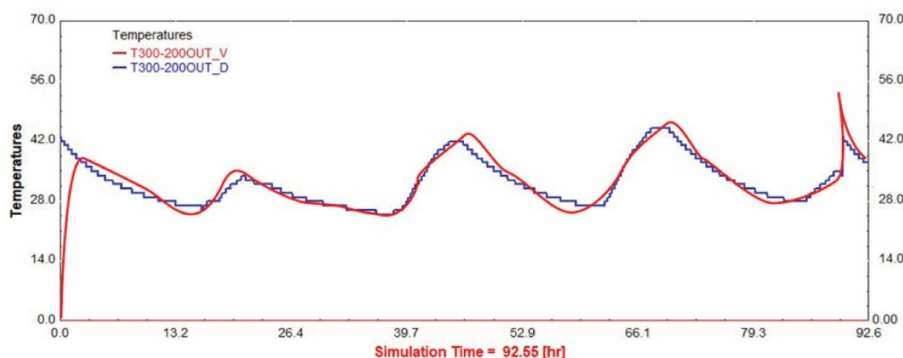
Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.56^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 4.1%. Наблюдава се много добро съвпадение между реалните и симулационните данни. Основните разлики са ограничени до върховете на температурните цикли и фазовите преходи, което е напълно очаквано при реални системи. Моделът е достоверен и подходящ за прогнозиране поведението на системата.



Фиг. 3.16. Графика на температурата на изхода на 200l воден резервоар

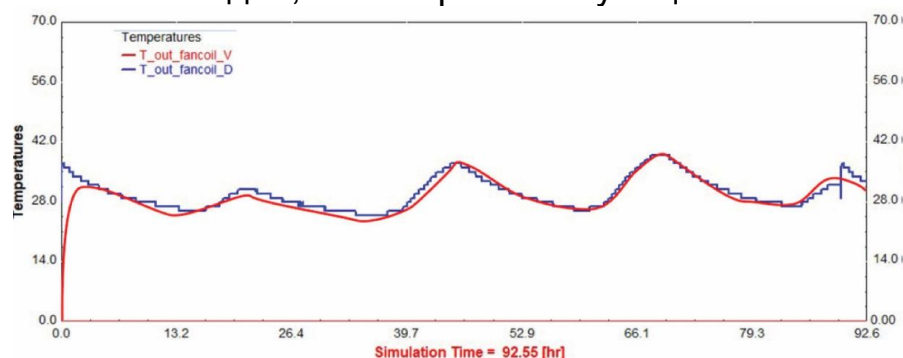
Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 0.56^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 1.56%. Основното отклонение се наблюдава в началото и края на

симулацията, но през повечето време се наблюдава добро съвпадение. Моделът е достоверен и адекватно описва динамиката на топлообмена в 200l воден резервоар.



Фиг. 3.17. Графика на температурата на изхода на 300l воден резервоар

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.11^{\circ}\text{C}$. Процентното отклонение около 3.2%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че въпреки отчетените циклични амплитуди в началото и края на симулацията те са сходни, което прави симулацията качествена.



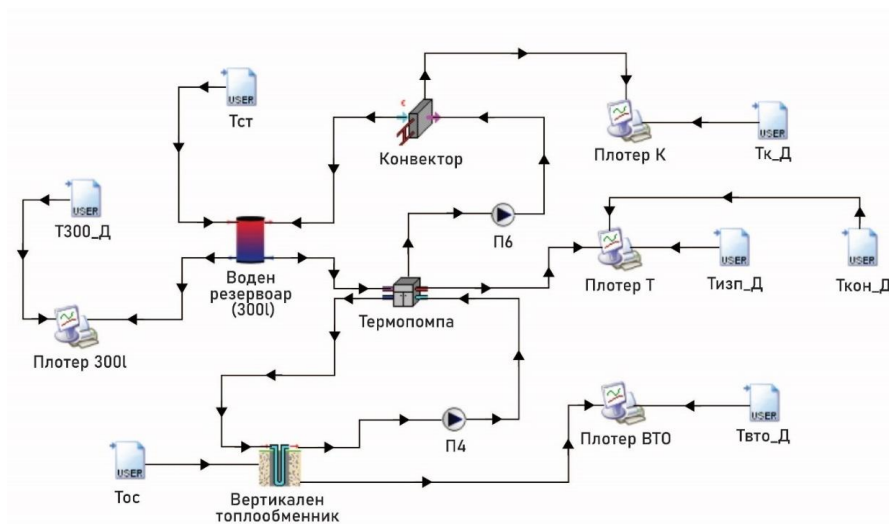
Фиг. 3.18. Графика на температурата на изхода на конвектора

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.39^{\circ}\text{C}$. Процентното отклонение около 4.2 %. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че имаме много добро съвпадение между данните. Наблюдаваме равномерни и систематични разлики, което е доказателство, че моделът е добре подбран.

Като заключение може да се каже, че създаденият модел на режим 3 е устойчив и представя реалното поведение на системата. Разликите между верификацията и предходните данни са пренебрежимо малки.

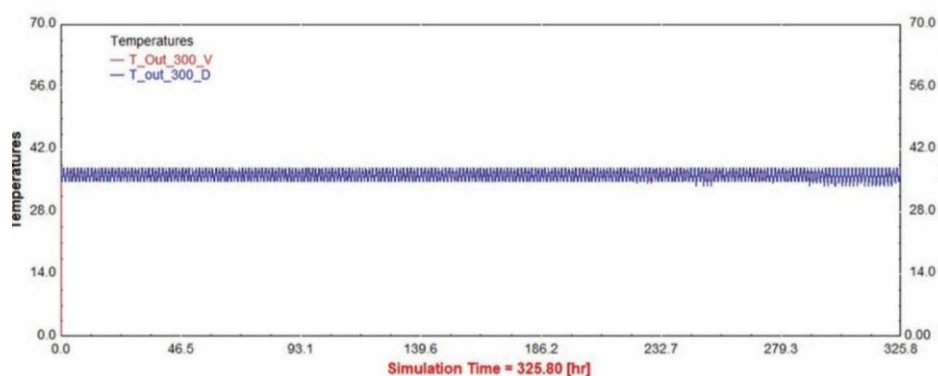
3.2.4. Симулационна схема и резултати от валидиране на режим 4

На фигура 3.19 е представена схема на режим 4 в комерсиалния софтуер TRNSYS.



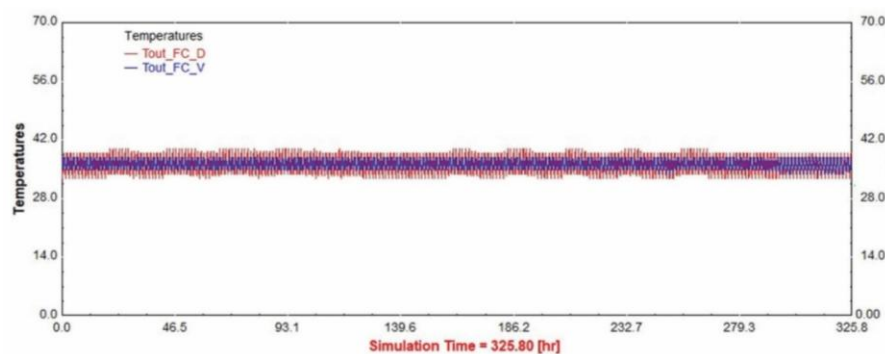
Фиг. 3.19. Симулационна схема на режим 4 в TRNSYS studio.

На графики 3.20, 3.21, 3.22, 3.23 и 3.24 са представени данните получени след валидиране на модела на режим 4 на системата. Данните от изследването са с продължителност $t = 19548 \text{ min}$, интервалите от време за запис на данните от реалното изследване е $\Delta t = 1 \text{ min}$.



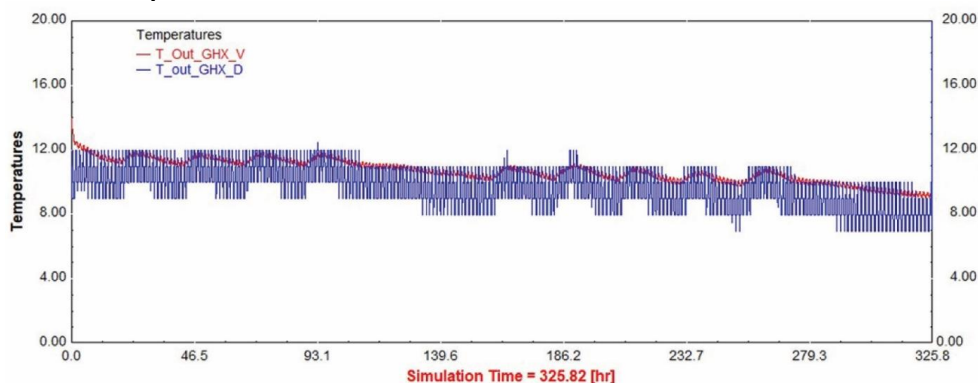
Фиг. 3.20. Графика на температурата на изхода на воден резервоар от неръждаема стомана с обем – 300 l

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 0.54^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 1.47%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че моделът описва прецизно както цикличната динамика, така и абсолютните стойности.



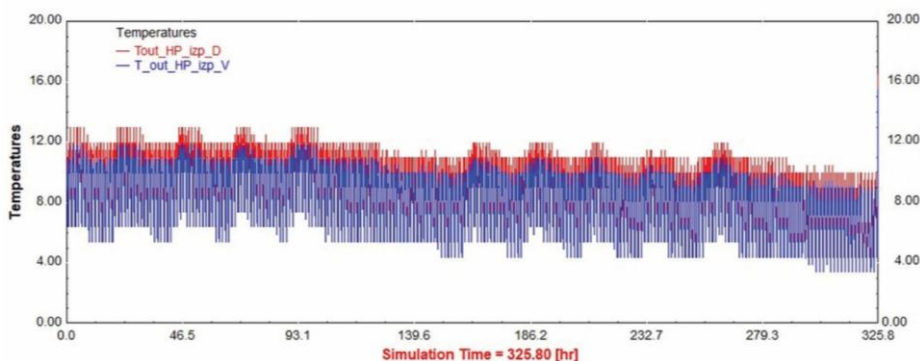
Фиг. 3.21. Графика на температурата на изхода на конвектор с воден кръг.

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.1^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 3.2 %. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че симулационният модел възпроизвежда успешно цикличния характер на реалните данни, с леки разминавания във върховете и спадовете. Наблюдаваме равномерни и допустими отклонения, което говори за надеждна и добра валидация на модела.



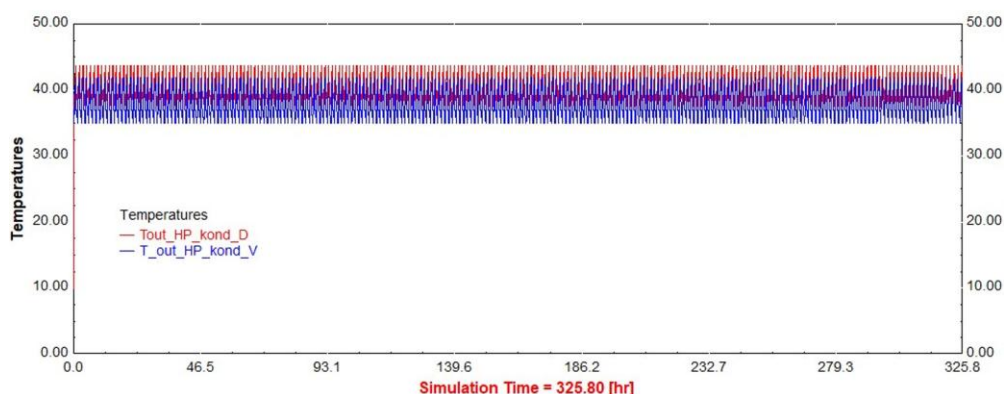
Фиг. 3.22. Графика на температурата на изхода на вертикалния топлообменник.

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.67^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 17.2%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че симулацията не улавя пълната амплитуда на цикличните промени, но тя успешно възпроизвежда общата температурна тенденция. Моделът е подходящ за оценка на средни термични характеристики



Фиг. 3.23. Графика на температурата на изхода на термopомпата, изпарител

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.71^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 16.5%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че моделът добре възпроизвежда средната температура, но има разминаване с около 2°C между данните от реалното изследване и симулацията, това го прави подходящ за оценка на общата енергийна ефективност, но слабо приложим за симулиране на краткотрайна динамика.



Фиг. 3.24. Графика на температурата на изхода на термопомпата, кондензатор

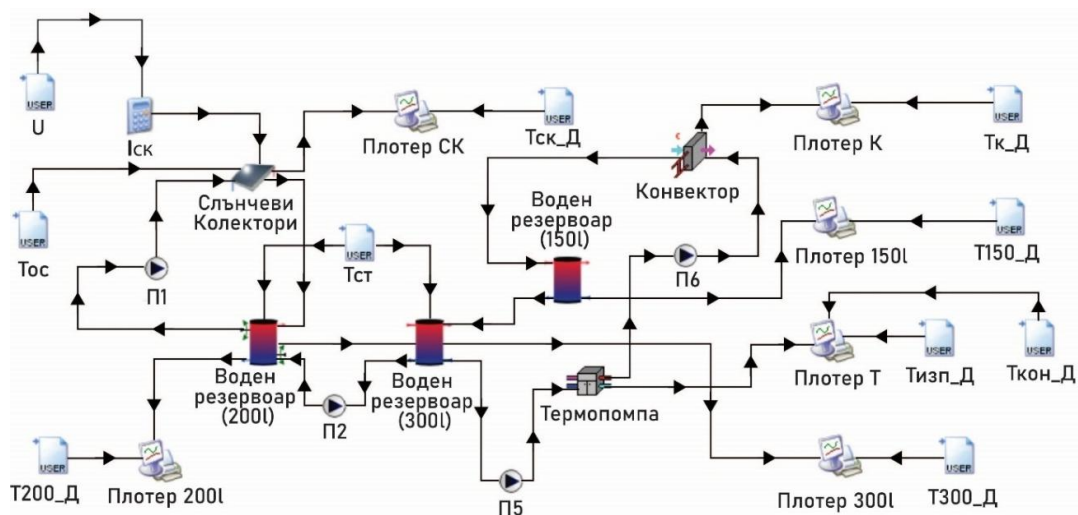
Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.80^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 4.6%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че моделът добре възпроизвежда средната температура и цикличната структура, но има разлика в амплитудата и загладени преходи. Това показва, че симулацията е достатъчно точна за оценка на енергийните потоци, но по-малко подходяща за анализ на краткотрайни динамични ефекти.

След извършената верификация на компонентите от режима можем да заключим, че симулацията не е особено успешна и не предвижда сравнително точно реалното поведение на системата. Не можем да кажем, че е достатъчно надеждна, за да бъде използвана за планиране на поведението на реална система.

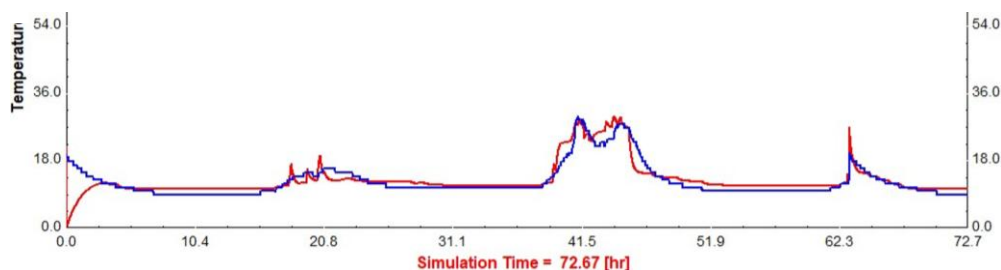
3.2.5. Симулационна схема и резултати от валидиране на режим 5

На фигура 3.25 е представена схема на режим 5 в комерсиалния софтуер TRNSYS.

На графики 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31 и 3.32 са представени данните получени след валидиране на модела на режим 5 на системата. Данните от изследването са с продължителност $t = 4360$ min, интервалите от време за запис на данните от реалното изследване е $\Delta t = 1$ min.

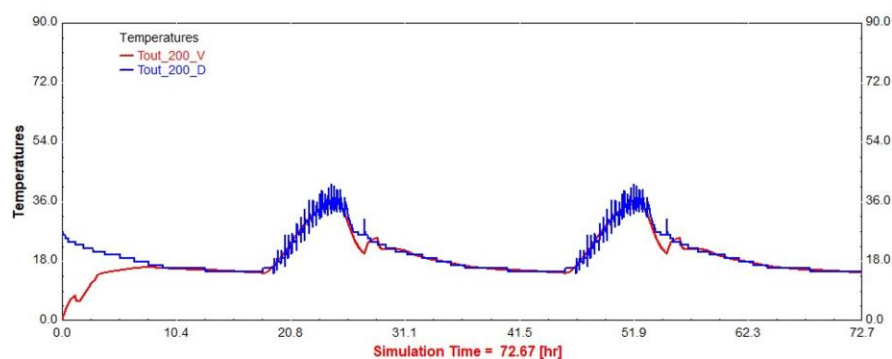


Фиг. 3.25. Симулационна схема на режим 5 в TRNSYS studio.



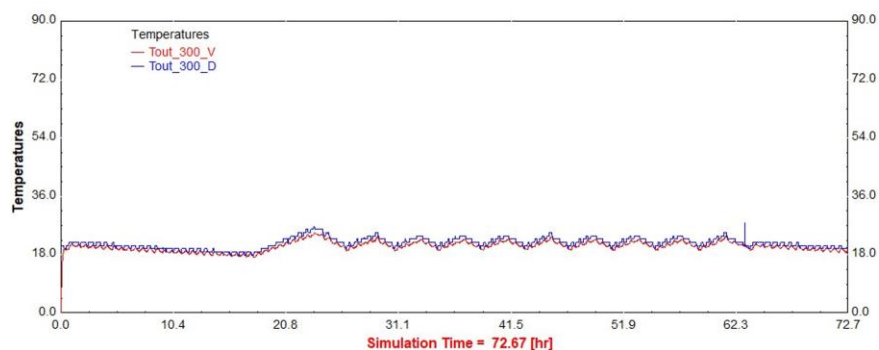
Фиг. 3.26. Графика на температурата на изхода на слънчевите колектори.

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.24^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 4.8%. Наблюдава се много добро съвпадение между реалните и симулационните данни с минимални отклонения в преходните фази и реалните данни. Това показва, че моделът на слънчевите колектори е добре валидиран, с висока точност за прогнозиране на термично поведение при реални атмосферни условия.



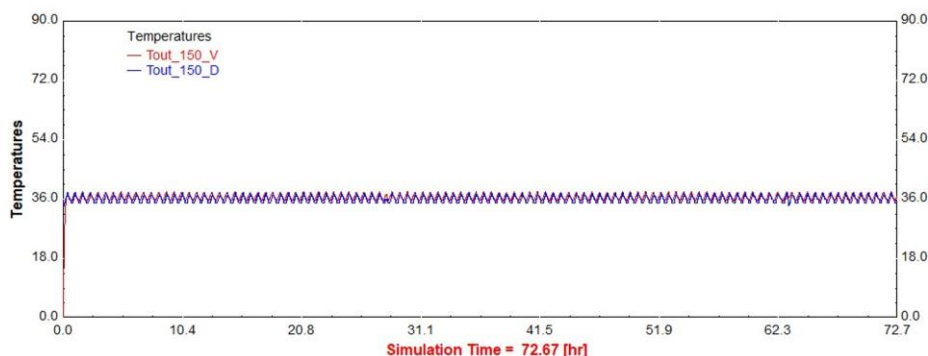
Фиг. 3.27. Графика на температурата на изхода на 200l воден резервоар.

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.30^\circ\text{C}$. Процентното отклонение е около 4.7%. Единственото значително отклонение се наблюдава в края на симулацията, но през повечето време се наблюдава добро съвпадение. Моделът е достоверен и адекватно описва динамиката на топлообмена в 200l воден резервоар.



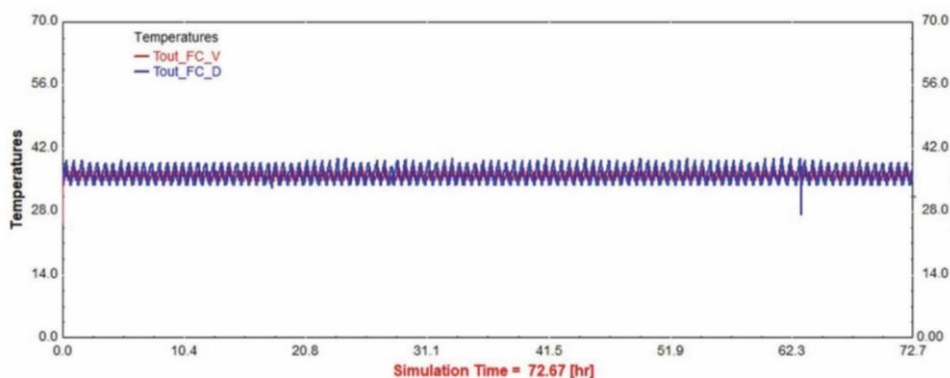
Фиг. 3.28. Графика на температурата на изхода на 300l воден резервоар.

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 0.45^\circ\text{C}$. Процентното отклонение е около 1.3%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, симулацията изключително добре възпроизвежда поведението на резервоара, с минимални отклонения и отлично следване на цикъла, това е доказателство, че моделът е подбран отлично и може да се използва за анализ на системата.



Фиг. 3.29. Графика на температурата на изхода на 150l воден резервоар.

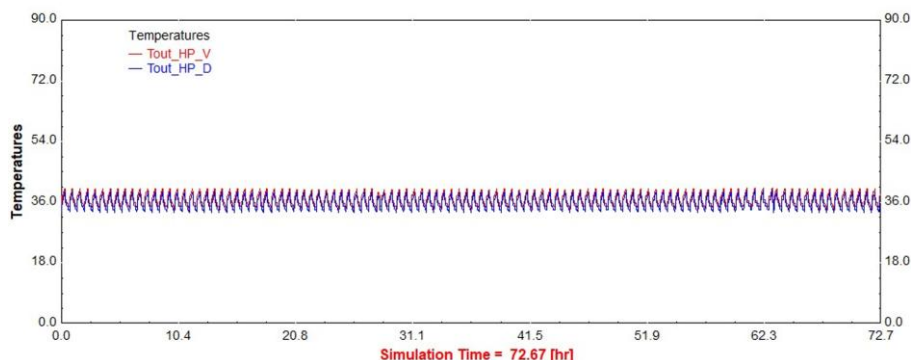
Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 0.32^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 0.7%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че симулацията има отлично съвпадение с реалните данни, методът показва висока точност и надеждност.



Фиг. 3.30. Графика на температурата на изхода на конвектор с воден кръг.

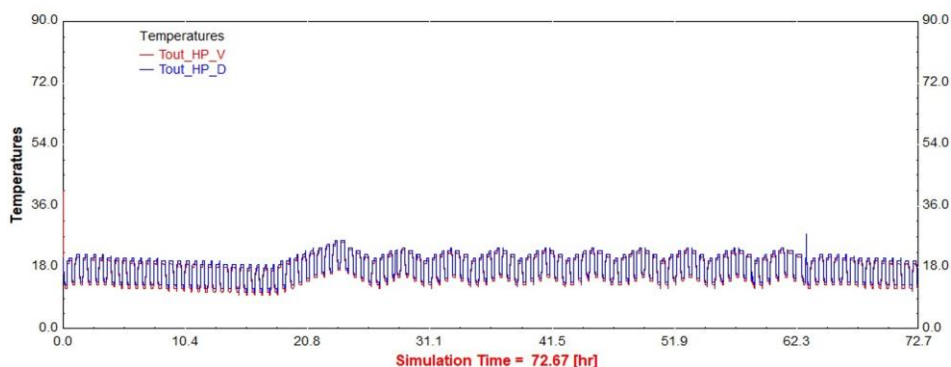
Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 0.65^\circ\text{C}$. Процентното отклонение около 1.9 %. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че

имаме много отлично и гладко съвпадение между данните. Наблюдаваме отличен резултат за верификация – моделът е надежден за прогнозен анализ и контрол.



Фиг. 3.31. Графика на температурата на изхода на термopомпата, кондензатор

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 1.0^{\circ}\text{C}$. Процентното отклонение около 1.5%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че моделът е подбран подходящо и може да бъде използван за предвиждане поведението на кондензатора на термopомпата.



Фиг. 3.32. Графика на температурата на изхода на термopомпата, изпарител

Стойността на изчисленото приблизително стандартно отклонение е $\sigma \approx 0.57^{\circ}\text{C}$. Процентното отклонение около 3.06%. След направения анализ на графиката може да се направи заключение, че моделът препокрива почти пълно данните от реалното измерване, като само малка част от отклоненията достигат 1.7°C . Може да се приеме, че симулацията за успешно валидирана.

След направената верификация между данните от реалното изследване и симулационните данни може да заключим, че за режима на работа е подбран адекватен и надежден модел, който може да послужи за прогнозиране реалното поведение на системата.

След извършеното валидирането на петте режима на работа от системата се наблюдава, че данните от реалното изследване и данните получени в следствие на симулацията на режимите на работа в софтуерът TRNSYS имат голяма степен на съвпадение. Може да се заключи, че така въведените параметри, входящи величини и изходни данни са коректно въведени и поведението на симулацията до голяма

степен повтаря поведението на реалната система. Симулациите може да се използват, за да се предвиди поведението на системата със сравнително висока точност.

ГЛАВА 4. СИМУЛИРАНЕ НА ХИБРИДНА ТОПЛИННА СИСТЕМА ПРИ РАЗЛИЧНИ РЕЖИМИ НА РАБОТА

В тази глава е разгледана ефективността на ХТС, което включва коефициента на покритие на системата в гр. Пловдив и сравнение на ефективността на системата между два града с различен климат.

Системата е изградена от слънчеви колектори, единичен вертикален топлообменник, термopомпа вода-вода, конвектор, 150l буфер, 200l и 300l водни резервоари, свързани в обща схема. Инсталацията има възможност да работи в пет режима на работа: два за зареждане и три за разреждане. Чрез ръчно превключване се извършва преминаването от един режим в друг.

Направено е изследване на стойностите на коефициента на покритие на ХТС само през отоплителния сезон, когато има нужда от отопление, т.е. през месеците от Октомври до Март включително. Направен е сравнителен анализ на стойностите на коефициента на покритие на ХТС в гр. Пловдив.

В настоящата глава е и представен и анализ от симулация на един от режимите на работа на ХТС на два града с различни климатични условия, като основен акцент се поставя върху сравнение на температурните и енергийни профили в два контрастни климатични региона – Пловдив, който е представител на умерено-континентален климат, и Хелзинки, който се характеризира със студен северноевропейски климат. Сравнението между двата града позволява оценка на адаптивността на системата и нейните предимства и ограничения в различни географски и климатични контексти.

Симулацията се извършва чрез комерсиален софтуер TRNSYS. Една от важните характеристики на софтуер е подпрограмата TRNBuild, която помага за създаването на отделен симулационен модел на сградата и нейните топлинни характеристики. Към ХТС е добавена и една основна отоплителна зона, съставляваща сградата.

4.1. Създаване на симулационен модел на сградата чрез TRNBuild

В дисертацията е използвано динамично моделиране на поведението на ХТС. За създаването на модела на помещението, което е цел на изследването на дисертацията, е използван методът на сивата кутия. Симулацията на сградата е направена чрез подпрограмата TRNBuild, която е подпрограма на основния софтуер

TRNSYS и има за цел максимално да пресъздаде топлинните характеристики и особеностите на сградата. Подпрограмата TRNBuild чете и обработва файлове с основните характеристики на сградата. Файловете се използват от компонент тип 56, за създаване на максимално близка до реалността симулация на топлинните характеристики на сградата. В дисертация ще бъде обърнато внимание само на отоплението на сградата.

4.2. Общо описание на компонентите, необходими за превключване между отделните режими на работа

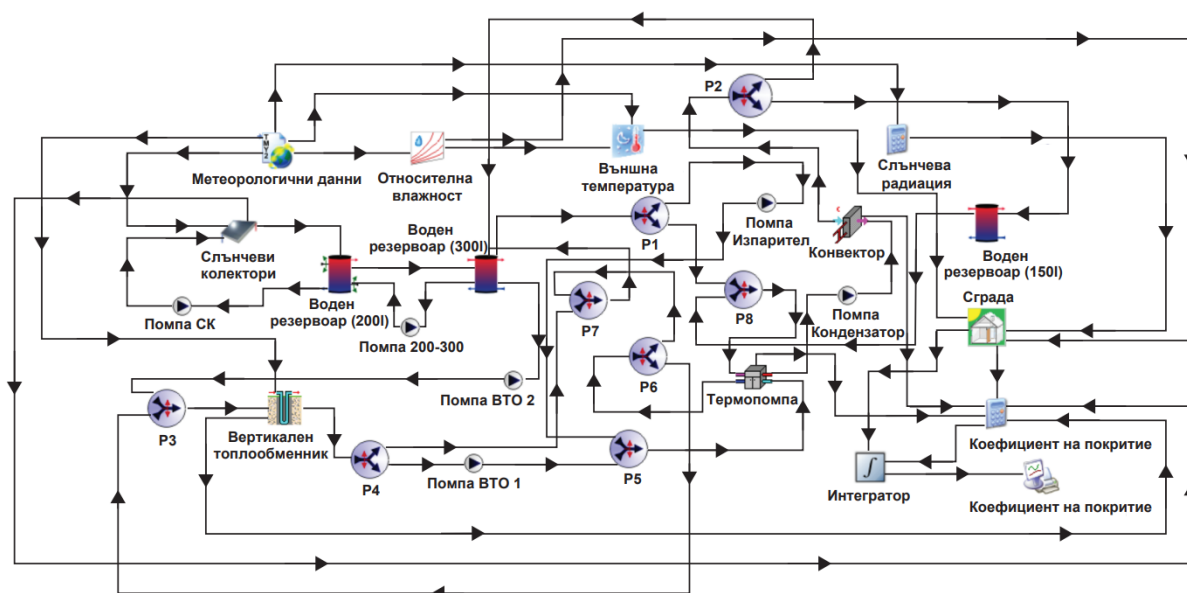
За контролиране на потока с цел превключване между различните режими на работа на флуида в общата схема на ХТС е използвал компонент тип 11. В симулацията присъстват два подтипа компоненти на тип 11, това са тип 11h и тип 11f.

4.3. Общо описание на компонентите, необходими за симулация на климатичните особености

Климатичните особености са въведени в симулацията на ХТС с три компонента: компонент за въвеждане на реални метеорологични данни тип 109, компонент за въвеждане на относителната влажност тип 33 и компонент, представляващ външната температура тип 69.

4.4. Обща схема на хибридната топлинна система, работеща в петте режима на работа

Общият модел на ХТС е разработен в TRNSYS. ХТС е съставена от пет режима на работа, като два са за зареждане с енергия и три за разреждане. Зареждането с енергия на системата се извършва от първите два режима на работа: зареждане на водните резервоари с топлинна енергия от слънчевите колектори и зареждане на вертикалния топлообменник с топлинна енергия. На фигура 4.3 е представена общата схема на ХТС съдържаща всички типове компоненти, необходими за работа в петте режима на системата.



Фиг. 4.3. Общата схема на системата в комерсиалния софтуер TRNSYS.

4.5. Изходни данни от компонентите на общата схема

От съществено значение е изходните данни на всеки компонент да бъдат предоставени коректно към другите компоненти в системата, за да се осъществи правилна комуникация между тях. За целта на изследването е съставена таблица в дисертацията, за да представи нагледно връзката между отделните компоненти. Таблицата се използва за по-добро разбиране на взаимодействията между отделните компоненти в системата.

4.6. Пресмятане на коефициента на покритие на системата за гр. Пловдив

Енергийната ефективност на ХТС се характеризира чрез коефициента на покритие. При изследването му системата работи само в режим на отопление през месеците от Октомври до Март когато има нужда от отопление.

Разбирайки характеристиките на ХТС, коефициентът на покритие се отнася до това, колко от общата топлина, необходима за отопление на дадено пространство, може да бъде осигурена от системата. Този коефициент измерва ефективността на системата в изпълнение на своята функция в сравнение с общите топлинни нужди на сградата. Коефициентът на покритие може да бъде изчислен чрез формула 4.1. Добавен е компонент, симулиращ поведението на калкулатор и в него е въведена формула 1, чрез която се изчислява коефициентът на покритие за цялата система.

$$(4.1) \quad \bar{Q} = \frac{\int_z Q_{\text{ин}}(z) dz}{\int_z Q_{\text{тт}}(z) dz}$$

Където:

$\bar{Q}$ – Коефициентът на покритие;

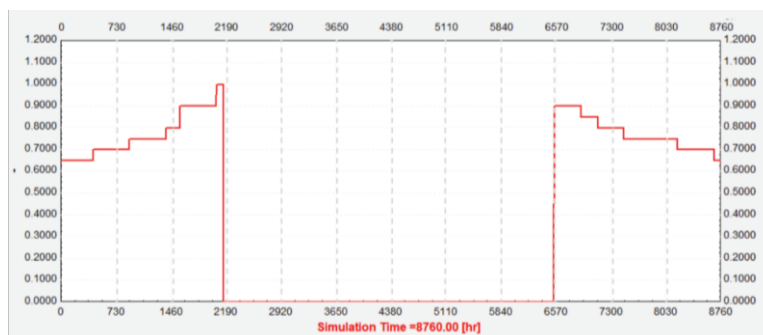
$Q_{\text{ин}}(z)$ – Добитата и оползотворена топлина от съответния елемент от системата във функция от времето z . [J];

$Q_{\text{тт}}(z)$ – Топлинния товар на консуматора, който трябва да бъде покрит във функция от времето z . [J].

z – Пространствена координата [m].

Като показател за ефективност, коефициентът на покритие оценява колко добре системата успява да използва наличните ресурси - като слънчевата енергия, топлообменния потенциал и други, за да подпомогне отоплителния процес. Стойностите на коефициента на покритие варират от 0 до 1, като достигне стойност от 1 се счита, че това е максимална стойност. Коефициентът на покритие за цялата ХТС се пресмята само за месеците, когато има нужда от отопление. Представена е обща диаграма за цялата година. Данните за общата диаграма на всеки град от изследването са с продължителност $t = 8760$ [h] или още може да се каже, че $t = 365$ [d], интервалите от време за запис на данните е $\Delta t = 1$ [h].

На фигура 4.10 е представена диаграма на коефициента на покритие за отоплителния сезон от месец Октомври до месец Март за град Пловдив.



Фиг. 4.10. Коефициент на покритие на системата за гр. Пловдив за една календарна година

От представена диаграма на коефициента на покритие отнасящ се за ХТС намираща се в гр. Пловдив, представена на фигура 4.10 може да се направят следните изводи: Високият коефициент на покритие в началото на отоплителния сезон, равняващ се на стойност от 0,9, показва ефективната работа на системата за отопление, включваща всички елементи на ХТС. Това е резултат от обилната слънчева радиация в гр. Пловдив и ефективното използване на топлинната енергия от слънчевите колектори. Достигайки до стойност от 1 на края на отоплителния сезон, показва, че системата за отопление е в състояние да осигури необходимото количество топлина през целия период на отоплителния сезон. Използването на различни компоненти като слънчеви колектори, термopомпа,

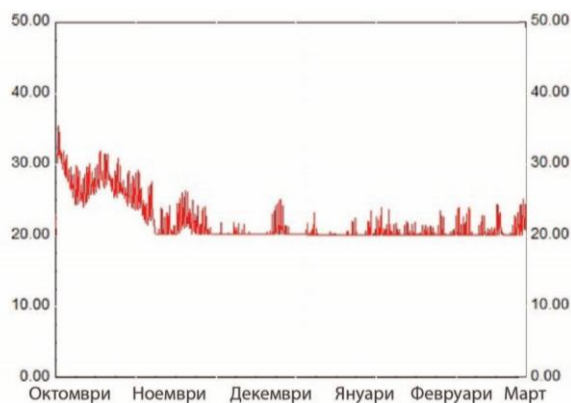
вертикален топлообменник и конвектор се оказва ефективно в съчетание, като води до постигане на оптимален коефициент на покритие за отоплителния сезон в град Пловдив. Общият анализ показва, че системата за отопление е ефективна и надеждна, като може да се справи с изискванията за отопление през отоплителния сезон в град Пловдив, осигурявайки комфорт и ниски разходи.

4.7. Сравнение на температурните и енергийните профили в гр. Пловдив и гр. Хелзинки.

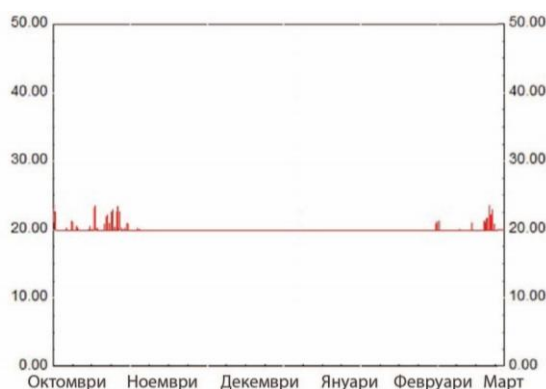
Направено изследване на характеристиките на ХТС, поставена в различни климатични условия. Целта на това изследване е да се анализира поведението на ХТС оборудвана с едни и същи компоненти, поставена в идентични по размер сгради, но в различни градове, като се сравни температурата в помещенията, профилите на скоростта на топлопренасяне и изразходваната енергия за отопление. Избраните градове са Пловдив, България и Хелзинки, Финландия. Те са избрани, защото са със значителни разлики в климатичните особености. Тези специфични особености в климата на двата града дават възможност да се оцени ефективността и поведението на ХТС, с цел последваща оптимизацията на нейната работа в различни климатични зони. Конфигурацията на системата остава една и съща за двата града, ХТС има възможност за работа и в петте си режима на работа. За анализ и сравнение на системата в двата града се използва отново комерсиалният софтуер TRNSYS, като климатичните особености на градовете се управляват от компонент тип 109. Основните критерии за сравнение между двата града са температурата в идентични по размер сгради с по една температурна зона намиращи се в градовете и количеството топлинна енергия, необходимо за поддържане на подходящи условия в ХТС.

Температурните характеристики на двете сгради са представени на фигури 4.11 и 4.12. Данните за общата диаграма на температурите от сградите във всеки град от изследването са с продължителност пет месеца или още може да се каже, че $t=4392$ [h], интервалите от време за запис на данните е $\Delta t=1$ [h].

На фигура 4.11 е представена диаграма на температурните характеристики на сградата, която се намира в Пловдив, на която се вижда, че през зимните месеци (от октомври до март) системата поддържа стабилна температура, като не спада под 20 °C. Също се наблюдават чести температурни пикове през целия отоплителен сезон, като максималната температура достига до 35 °C. Тези температурни пикове вероятно се дължат на колебанията в климата и слънчевата радиация. Тъй като системата за климатизация е настроена да работи само в режим на отопление, то през някои топли дни с високи стойности на слънчевото греене симулацията показва значително повишение на температурата в стаята.



Фиг. 4.11. Температурен профил на сградата в Пловдив.



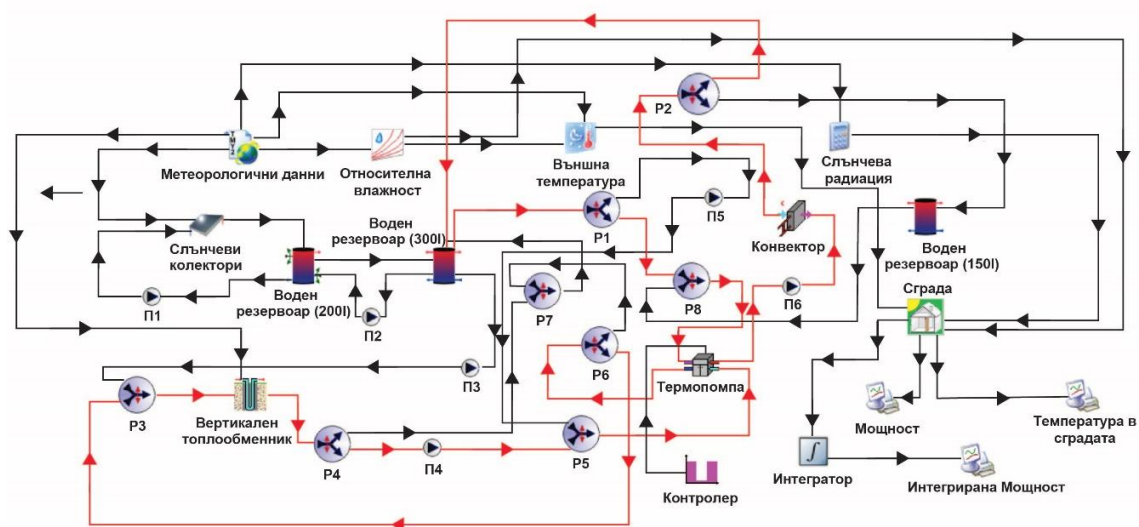
Фиг. 4.12. Температурен профил на сградата в Хелзинки.

На фигура 4.12 е представена диаграма на температурните характеристики на сградата, която се намира в Хелзинки, на която се вижда, че през зимните месеци (от октомври до март) системата поддържа стабилна температура, като не спада под 20 °С. Наблюдават се изключително редки пикове, които са отчетени единствено през месеците Октомври и Март, като максималната стойност на температурата достига до 24 °С, тези пикове вероятно се дължат на промяната на климата и настъпващото затопляне и продължителността на светлата част на деня и следователно повишената слънчева радиация.

От двете диаграми, които представят температурните особености на разгледаните градове, може да направим заключение, че в Пловдив температурите са значително по високи през зимата, което може да позволи на хибридната система да работи по-добре с помощта на слънчеви колектори. По ниските температури и ограничената слънчева радиация в Хелзинки затрудняват работата на ХТС и я правят зависима от термопомпата и вертикалния топлообменник. Преходните сезони в Пловдив са значително по-стабилни в температурно отношение и позволяват на системата да работи с по-малко потребление на енергия. По-кратките и значително по-хладни преходни сезони в Хелзинки предизвикват системата да

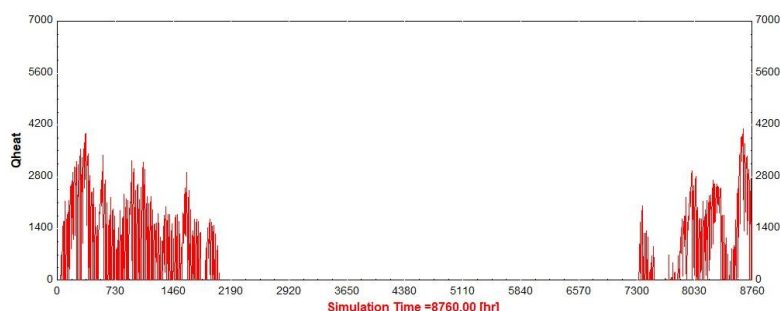
срещне трудности при поддържането на комфортна температура при използване само на енергията от слънчевите колектори.

Един от ключовите аспекти при изграждането на ХТС и последващо оценяване на нейната ефективност е изчисляването на необходимата топлинна енергия на системата, за да работи адекватно. В тази част от изследването е изчислено количеството топлинна енергия, необходимо за поддържане на подходящи условия в ХТС, отново за двата града Пловдив и Хелзинки. При изчислението е необходимо да се добави интегратор. Чрез интегратора се интегрира електрическата мощност на от сградата за периода на симулацията. От съществено значение е да се определи количеството топлинна енергия, необходимо за поддържане на подходящите условия в ХТС. Определянето на количеството топлинна енергия е извършено през отоплителния сезон. Затова е използван режим 4 на системата, при който отоплението се осъществява с помощта на земно базирана термопомпа. Този режим е особено важен за зимния период, когато други източници на топлина са недостатъчни, а отоплителните нужди са доста високи, за това е избран именно той.



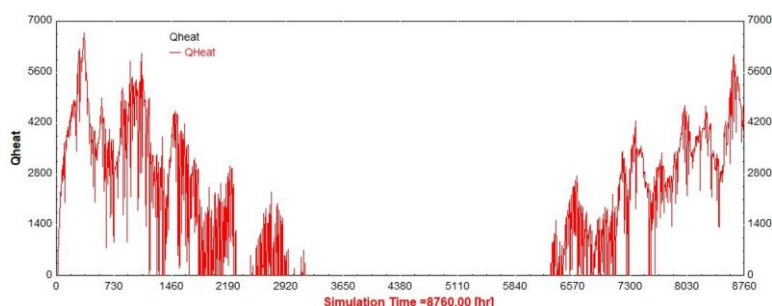
Фиг. 4.13. Схема в TRNSYS на цялата ХТС в режим 4

На фигури 4.14 и 4.15 са представени диаграми на мощността за 8760 [h] на системата в градовете Пловдив и Хелзинки.



Фиг. 4.14. Годишен профил на мощността на ХТС в град Пловдив

На фигура 4.14 представяща работата на системата в Пловдив се вижда, че работи с по-ниска интензивност. Системата се нуждае от по-малко енергия и мощност, за да поддържа комфортни условия в сградата, което е резултат от благоприятния умерено-континентален климат, както и от по-краткия отоплителен сезон и обилната слънчева радиация.

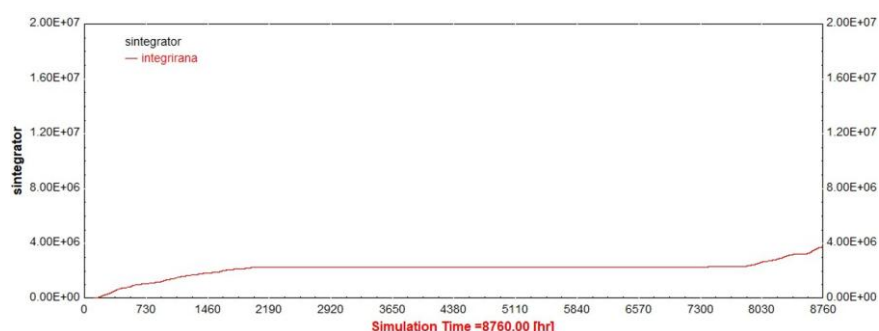


Фиг. 4.15. Годишен профил на мощността на ХТС в град Хелзинки

На фигура 4.15 представяща работата на системата в Хелзинки се вижда, че тя работи доста интензивно. Системата поддържа високи стойности на топлинната мощност през отоплителния сезон, което е обусловено от студения климат и дългия отоплителен сезон в региона. Забелязва се големи амплитуди, което показва, че системата трябва да осигури висока мощност, за да компенсира липсата на слънчева радиация и да отговори на високите отоплителни нужди.

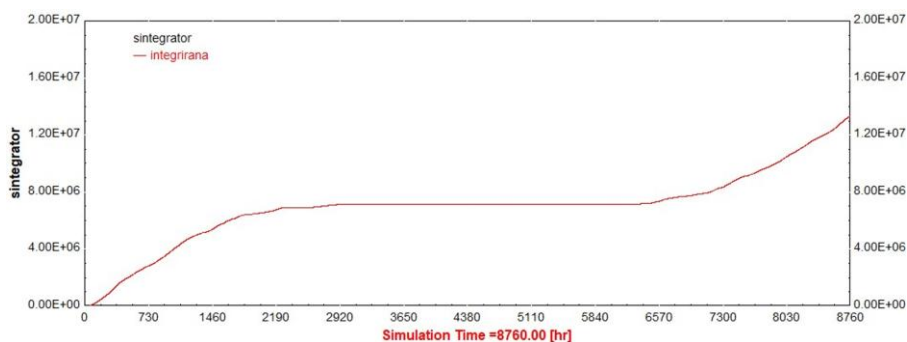
От диаграмите на топлинната мощност се забелязват ясни различия, свързани с климатичните особености в двата града. Важен фактор за сравнение между двете диаграми е продължителността на отоплителния сезон. След анализа на диаграмите на моментната мощност на системата в двата града е направено интегриране на получените стойности, което дава възможност да се определи общата енергия, необходима за отопление през годината. Чрез изследването на интегрираната мощност може да се осигури по задълбочен анализ на енергийната ефективност на системата във различни климатични условия.

Количеството енергия, което е консумирала системата се изчислява чрез интегриране на мощността за периода от 8760h.



Фиг. 4.16. Годишен интегриран разход на енергия в ХТС в град Пловдив

На фигура 4.16 е представена графика на интегрираната мощност на системата от Пловдив и показва слабо изразен ръст на интегрираната мощност, което показва по-малка нужда от отопление през годината. Максималната стойност достига около 4.0 MWh, което е значително по-ниско от стойностите в Хелзинки, което съответства на по-умерен климат.



Фиг. 4.17. Годишен интегриран разход на енергия в ХТС в град Хелзинки.

На фигура 4.17 е представена графика на интегрираната мощност на системата от Хелзинки, в която се наблюдава плавен и постоянен растеж на интегрираната мощност в зимния сезон. От което може да се направи извода, че ХТС в Хелзинки работи много активно, особено в студените месеци. Стойността за един отоплителен сезон достига около 13.3 MWh, което е индикация за високата необходимост от отопление в северния климат, където зимата е по-дълга и по-студена. Енергийният разход за отопление в Хелзинки е 3.3 пъти по висок от този в Пловдив.

Сравнявайки двете диаграми, можем да заключим, че в Хелзинки ХТС има значително по-високо натоварване и осигурява повече енергия за отопление в сравнение с Пловдив. Това е логичен резултат от по-студения и дълъг зимен период в Хелзинки, за разлика от по-меките зими в Пловдив. Този контраст между двете диаграми ясно демонстрира как климатичните условия оказват влияние върху ефективността и необходимостта от използване на ХТС за отопление.

Това изследване подчертава адаптивността на ХТС при различни климатични условия и демонстрира нейната ефективност. Важно е да се отбележи, че при по-ниски температури, като в Хелзинки е хубаво да се осигури адекватна изолация, за да се минимизират колебанията в мощността и да се осигури стабилност на системата.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

1. В средата на TRNSYS Simulation Studio са създадени симулационни модели на функционирането на хибридна система за отопление и охлаждане на сгради при работата и в пет базови режима:
 - Режим 1: „Зареждане на денонощния топлинен акумулатор“
Слънчевите колектори зареждат водните резервоари с топлинна енергия.
 - Режим 2: „Зареждане на сезонния топлинен акумулатор“
Слънчевите колектори зареждат вертикалните топлообменници с топлинна енергия.
 - Режим 3: „Отопление със слънчева енергия“
Слънчевите колектори зареждат водните резервоари с топлинна енергия, която се подава директно към конвектора.
 - Режим 4: Отопление чрез земно базирана термopомпа.
 - Режим 5: Отопление чрез земно базирана термopомпа със слънчево подпомагане.
2. Направено е верифициране на функционирането на системата в процеса на работата и в петте режима. Верифицирането е извършено чрез сравнение на резултатите от симулацията с помощта на комерсиалния софтуер TRNSYS, с данните от експериментално измерените стойности на сравняваните параметри. В процеса на верифициране са подбрани адекватни стойности на параметрите на математичните модели на системните компоненти. Верификацията отчита много добро съвпадение на измерените и симулирани стойности.
3. Създаден е модел, чрез комерсиалния софтуер TRNSYS, който позволява да се изследва работата на системата в петте режима на работа. Режимите са свързани в обща схема, за да се анализира влиянието на отделните параметри върху работата на цялата система. Този подход позволява да се приложат различни алгоритми за оптимизация, позволяващи отчитането на конкретните климатични особености на локацията, както и извършването на оптимален избор на критериите за преминаване от един режим в друг.

Приложни приноси

4. Създаден е алгоритъм за използване на методиката за изчисляване на коефициента на покритие на ХТС с цел повишаване енергийната и продуктивност. Като показател за ефективност, коефициентът на покритие оценява колко добре системата успява да използва наличните ресурси - като слънчевата енергия,

топлообменния потенциал и други, за да подпомогне отоплителния процес. По-високият коефициент на покритие показва, че системата може да покрие по-голяма част от топлинните нужди на пространството, което обслужва и следователно е по-ефективна. Тази мярка е полезна при проектирането и оценката на хибридни топлинни системи, тъй като позволява на инженерите и дизайнерите да определят потенциалните енергийни изгоди и да оптимизират конфигурацията и оперативните параметри на системата за постигане на по-голяма ефективност. Коефициентът на покритие се изчислява за шест поредни месеца от отоплителния сезон в гр. Пловдив, като са представени диаграми за всеки месец отделно и по една обща за една календарна година.

5. Направен е анализ на ефективността на ХТС при различни климатични условия. Анализът е извършен чрез симулации, базирани на софтуера TRNSYS и подпрограмата TRNBuild. Сравнението между температурните характеристики на ХТС в Пловдив и Хелзинки показва, че системата успешно се справя да поддържа нуждите от 20 °C през зимните месеци и в двата града. Поради различните климатични особености и стойността на слънчевата радиация на двата града се наблюдават съществени разлики между температурните пикове. Отоплителният сезон в Хелзинки е значително по-продължителен от този в Пловдив. В Пловдив, поради умерено-континенталния климат, слънчевата радиация е по-обилна, което поддържа стабилно ниво на мощност през годината. В Хелзинки, където климатът е по-студен и има по-малко слънчева енергия, системата трябва да компенсира тези условия чрез увеличено натоварване на термопомпата.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Popov, R. K., Lishev, S. N., Georgiev, A. G., Vasileva, N. D. Optimal position sensor for orientation of photovoltaic plants. Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv, "Fundamental Sciences and Applications", Vol. 21, 2015, pp. 169–174.
2. Georgiev, A. G., Shahin, M., Popov, R. K., Deger, K., Vassilieva, N. D., Toshkov, E. Simulation of hybrid thermal installations. Proceedings of the 17th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES 2015), October 4–8, 2015, Istanbul, Turkey, Paper1039.pdf, ISBN 978-605-86911-2-4.
3. Toshkov, E., Georgiev, A. G., Popov, R. K., Vassileva, N. D. Investigation methods of hybrid Ground Source Heat Pump system with solar collectors. Proceedings of the Union of Scientists, Ruse. 6th International Conference "Energy Efficiency and Agricultural Engineering", November 11–12, 2015, Ruse, Bulgaria, ISSN 1311-9974, pp. 55–62.

4. Vassileva, N. D., Georgiev, A. G., Popov, R. K. Simulation study of hybrid ground-source heat pump system with solar collectors. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, 2016, pp. 71–76.
5. Vassileva, N. D. Modelling the process of charging water tanks with heat from solar collectors using TRNSYS. Proceedings of “Alternative Energy Sources, Materials & Technologies, AESMT’21”, Vol. 3, 2021, pp. 21–22.
6. Georgiev, A. G., Popov, R. K., Vassileva, N. D., Kehayov, K. R. TRNSYS process modelling of borehole thermal energy storage charged by solar collectors. Proceedings of “Alternative Energy Sources, Materials & Technologies, AESMT’22”, Vol. 4, 2022, pp. 9–11.
7. Vassileva, N. D., Popov, R. K., Georgiev, A. G. Simulation of a combined heating installation by the Bulgarian climatic conditions. Proceedings of “Alternative Energy Sources, Materials & Technologies, AESMT’24”, Vol. 6, May 14–15, 2024, Sofia, Bulgaria, ISSN 2603-364X, pp. 33–34.

SUMMARY

Title of the Dissertation: Simulation Study and Analysis of a Hybrid Thermal System with Renewable Energy Sources

Author: M.Sc. Eng. Nadezhda Vassileva

The dissertation provides an analysis of the literature related to the topic. The main types of components that make up hybrid heating systems are described, mathematical modeling methods and software products necessary for simulation are presented, also examine examples of hybrid heating systems from different countries.

Mathematical models of the main components of the system have been described and selected, and the TRNSYS software environment has been chosen. The main subject of the research is an existing hybrid installation, located in Technical University of Sofia, Plovdiv branch.

Based on data from an experimental study of the hybrid thermal system, simulation models of five different operation modes of the system have been created and validated, with each mode being modeled using the TRNSYS software. All operating modes except mode 4 show a high degree of agreement between simulation and experiment, which means that the models are suitable for predicting and optimizing the system with high reliability.

An energy assessment of the system’s efficiency, the influence of climatic conditions and the load in two cities with different climatic features – Plovdiv and Helsinki – was made.

Based on the results obtained, the possibility of increasing efficiency through appropriate selection of components in the system can be confirmed.